〈기술논문〉

ISSN 1226-0959 eISSN 2466-2089

Micromix 원리를 적용한 연소기 연구개발 동향

김승민·이형진[†]

인하대학교 항공우주공학과

Trends in Research and Development of Combustor Applying the Principle of Micromix

Seungmin Kim and Hyoungjjn Lee

Department of Aerospace Engineering, Inha University

(Received 11 December 2023, Received in revised form 16 February 2024, Accepted 16 February 2024)

ABSTRACT

Energy demand and environmental pollution control are challenging issues in the field of gas turbine applications, with the aim of achieving zero carbon and low NOx emissions from combustion gases. In this context, hydrogen fuel is anticipated as a future energy source capable of replacing carbon-based fuels. However, hydrogen presents technological challenges related to safety issues such as flashback and autoignition. Additionally, there is a need to address issues of increased NOx emissions due to high adiabatic flame temperatures. To overcome these challenges, research is underway to develop combustion systems, particularly in the form of micromix or micro-mixer configurations. The micromix combustion system, which uses small nozzles and flames, has been evaluated as one of the most suitable combustors for hydrogen and hydrogen-blended fuels by preventing flashback and reducing NOx emissions. This paper introduces the effect of various geometric factors, such as fuel injection shapes, fuel inlet and nozzle numbers, and internal configurations, on the optimal design and combustion instability of micromix combustion systems. The characteristics of combustion systems developed by research institutions and companies are also analyzed. The paper concludes with a discussion on the applicability of micromix combustion systems to hydrogen combustion applications.

Key Words : Micromix, Micro-mixer, Gas turbine, Hydrogen, Flashback, NOx(Nitrogen oxide)

1. 서 론

2017년 IEA에서 발간한 세계 에너지 전망 보고서에 따 르면 2040년까지 에너지 수요는 꾸준히 증가할 것으로 예 상된다[1]. 늘어나는 에너지 수요를 대응하기 위해 안정적 이고, 효율적이며, 확장이 용이한 에너지 시스템인 가스 터빈의 역할이 더욱 중요해질 것으로 기대된다. 그러나 천 연가스 등 화석연료를 주 연료로 사용하고 있는 가스터빈 의 연소 과정은 질소산화물(NOx) 및 일산화탄소(CO) 등 오염물질을 배출하게 되며, 이 오염물질은 지구온난화와 같은 환경오염 문제를 일으키게 된다.

⁺Corresponding Author, hyoungjin.lee@inha.ac.kr

환경문제 대응을 위한 가스터빈 제조사들은 오염물질 배출 저감을 목적으로 기존의 비예혼합 연소 시스템에서 희박 예혼합(lean pre-mixed, LPM) 연소기술로 전환하였 다. 이후 LPM 연소기술을 기반으로 dry low NOx(DLN), enhanced vortex(EV), Perforated-plate(PP) 그리고 micromixer(MM) 버너 등 새로운 형태의 연소기를 개발하고자 노력하고 있다. 하지만 오염물질의 배출 규제가 더욱 강화 됨에 따라 최근에는 수소 연소에 주목하고 있다. 수소는 무탄소 연료로 환경친화적이며, 지역적 편향 없는 보편적 인 에너지원으로써 지속 가능한 물질이다. 기존의 가스터 빈 연료와 특성 차이는 있지만, 이러한 장점을 이용하기 위해 가스터빈에 수소 및 수소 혼합연소를 적용하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다.

차세대 연료로 각광 받고 있는 수소 연료는 DLN 연소기 와 같이 LPM 연소 시스템이 적용되었을 경우, 수소의 연 소특성으로 인해 발생할 수 있는 기술적 문제들이 보고되

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licences/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



Fig. 1. Schematic of a gas turbine combustor applying the micromix concept[4].

고 있다. 높은 반응성으로 인해 발생할 수 있는 역화 (flashback), 낮은 자연발화 온도 및 짧은 점화지연시간으 로 나타나는 자연점화(Autoignition) 등이 해당한다. 또한, 높은 단열 화염 온도 역시 문제가 될 수 있는데, 이는 질소 산화물 배출량의 증가로 규제 준수를 어렵게 한다[2]. 이 러한 문제를 극복하기 위해 Dry low-NOx Micromix 또는 Micro Mixer type의 연료 노즐을 다수 적용한 Multi-jet 형 식의 연소기 개발 연구가 진행되고 있다[3]. Micromix(이 하 MM)의 개념이 가스터빈 엔진에 적용된 개념을 Fig. 1 에 제시하였다.

MM 연소 시스템은 인젝터의 연료 주입구 크기가 평균 1 mm 이하로 구성되어 있으며, 수소 또는 수소 혼합연료 를 여러 노즐을 통해 연료 제트를 공기와 교차로 혼합시킨 다. 노즐의 소형화와 소형 화염구에서의 반응물 체류 시간 을 짧게 하여 NOx를 획기적으로 감소시킬 수 있는 것으로 알려져 있으며, 수소 연소의 문제 중 하나인 역화의 위험 을 피할 수 있는 장점이 있다[4].

수소 전소 및 혼소에 효과적일 것으로 판단되는 MM 연 소 시스템은 수소의 연소 특성과 오염물질 배출제어를 위 해반응속도, 혼합성능 그리고 체류시간 등이상세요소 를 고려하여 연구가 진행되고 있다. 반응속도는 가스터빈 의사이클 연소 과정 중 환경 조건인 온도와 압력의 영향을 받으며, 이를 최적화하면 질소산화물 배출을 감소시킬 수 있으나 가스터빈의 효율을 낮추는 문제가 발생한다. 혼합 물을 예혼합 수준으로 높이게 되면 NOx 배출은 낮아지지 만, 가스터빈의 작동 조건에 따라 역화에 대한 위험이 증 가한다. 또한, 확산형 화염을 이용하여 질소산화물 배출 을 제어하기 위해서는 높은 생성속도를 제한하는 최적화 된 혼합 능력이 필요하며, 수소 연소 시 고온영역에서의 반응물의 체류 시간이 길어질수록 NOx의 배출량이 증가 한다[5-7]. 이상 3가지 요소들을 고려했을 때 MM 연소 시 스템은 연소기의 type과 전체 형상에 따라 최적화가 필요 한 것으로 보인다. 다음 Table 1 은 MM 연소 시스템 최적

Parameters	MM system type	
	Pre-mixed	Non-Premixed
Fuel inlet diameters	[12],[13]	[14],[15]
	[18]	[16],[17]
	[19],[20]	
Fuel inlet & nozzle	[21],[22]	
shape	[23],[24]	-
	[25]	
Number of fuel inlets	[26]	[27]
Bluff body & baffle	[28],[29]	
	[30],[31]	[32]
	[33],[34]	
Combustion instability	[44],[45]	
	[46],[47]	-
	[48],[49]	
	[8],[36]	
Multi-nozzle	[37],[38]	[42].[43]
micromix	[39],[40]	[50],[51]
combustor	[41],[52]	[54]
	[53]	

Table 1. References for micromix combustor

화를 위한, 고려 되어야 하는 인자 및 연소 불안정성 등 연 구 중인 MM 연소기에 대해 정리한 것이다.

본 연구에서는 이를 바탕으로 역화와 같은 수소 연소 특 성 제어와 낮은 NOx 배출량을 위한 연소기 형상 설계에 영향을 미치는 인자들에 대해 연구 사례를 분석하고자 한 다. 특히, 저탄소 배출의 차세대 연료로 각광 받고 있는 수 소 연소에 있어 가장 적합하다 평가되는 MM 연소 시스템 에 대한 연구 동향을 확인하고자 한다. 이를 위해 주로 연 료 주입구 직경, 노즐 및 주입구의 형상 등 MM 연소에 영 향을 미치는 형상 인자에 대한 연구를 분석하고, MM 연소 기술에서 나타날 수 있는 연소 불안정성을 확인한 후, 차 세대 가스터빈 엔진으로써의 적용을 위해 연구개발 되고 있는 MM 연소 시스템에 대한 특징을 소개하였다.

2. Micromix 연구 동향

2.1 Micromix 원리

MM 연소 시스템은 연료와 산화제가 microscale로 혼합 되는 버너의 유형이다. 기존의 단일 화염 대신 매우 작은 화염을 통해 터빈 연소기 내부의 열 방출을 분산시키기 위 한 것으로 튜브 내부에서의 화염 고정 위험을 완화하며, 화염 영역에서의 충분한 열을 제거하고, 화염이 내부로 전



Fig. 2. Combustion principle of Micromix (a) pre-mixed type[8] and (b) non-premixed type[14].

파될 때 국지적으로 소멸시키는 특징이 있다. 이는 수소 또는 수소의 함량이 높은 연료를 사용하는 가스터빈 운영 과 질소산화물(NOx) 배출량 저감에 대응하기 위해 고안 되었다. Fig. 2에 널리 알려진 두 가지의 형태의 MM 버너 개념도를 제시하였다. Fig. 2(a)는 예혼합 형식의 기본적 인 MM 버너 형태로 전면과 후면 plate 사이에 여러 개의 밀리미터 크기의 직선 튜브를 배치하여 직선 튜브 입구에 는 산화제를, 직선 튜브 측면에는 마이크로 홀을 통해 기 체 연료를 주입한다. 각 튜브에서 공급된 산화제와 마이크 로 홀을 통해 공급된 연료 가스가 혼합 후 연소 되는 예혼 합방법이다[8]. Fig. 2(b)는 독일의 아헨대학교에서 1990 년부터 연구 개발한 비예혼합 형식의 MM 버너이며, 현재 상용화된 방법 중 하나이다. NOx 배출량을 크게 줄일 수 있는 수소 micromix 확산 연소방법으로써, 1 mm 이하의 미세한 주입구를 통해 여러 개의 작은 화염을 생성하고, 작은 화염이 공기와 빠르게 혼합됨에 따라 반응물의 체류 시간이 짧아져 NOx 배출을 저감 시키는 원리이다[9,14]. 여기서 두 형태의 공통점은 화염 소형화를 위해 microscale의 연료 주입구로부터 발생하는 제트(jet) 현상을 활 용한다는 점이다. 이는 MM 연소기의 기본이 되는 lean direct injection(LDI) 방식을 적용한 것으로 빠른 혼합을 위해 연료가 여러 위치에서 산화제에 주입되며, 이는 빠른 반응성을 가지는 수소의 연소 특성 문제인 역화를 방지하 는데 적합하다. 또한, 교차 유동(cross-flow)을 포함한 선 회(swirl), 반경(radial) 및 축류 유동(axial) 및 동축 유동 (co-flow) 등 다양한 혼합 방식을 적용할 수 있다[10,11].

2.2 형상 인자별 연구 결과 분석

2.2.1 연료 주입구 직경에 따른 영향

연료 주입구 직경은 연료-산화제 혼합 등에 영향을 미치 는 것으로 알려져 있다. Araoye 등은 예혼합 타입의 단일 MM 노즐을 이용하여, 연료 주입구 직경 변화에 따른 혼합 성능에 대해 조사하였다[12]. 튜브 길이 L=10D와 일정한 유량으로 주입되는 연료 주입구 직경을 1 mm부터 0.2 mm 간격으로 감소시켜 수치연구를 진행한 결과, 직경 0.2~ 0.35 mm 사이에서 90% 이상의 높은 혼합 성능을 확인하 였다. 이는 연료 주입구의 직경 감소가 산화제와 혼합되는 연료의 분사속도를 증가시켜 혼합에 영향을 주지만, 연료 주입구의 직경 변화의 영향보다는 산화제와 연료의 운동 량 비율이 혼합에 있어 더 큰 영향을 미치기 때문임을 확인 하였다.

Cha와 Hwang은 연료 공급 주입구 직경의 변화에 따라 노즐 주위 발생하는 재순환영역의 크기와 연소 특성 간의 영향을 분석하였다. 채널 길이 50 mm의 MM 예혼합 단일 노즐을 대상으로 연료 주입구 직경을 2 mm에서 0.5 mm 간격으로 변화시켜 연소 특성을 확인하였다[13]. 수치해 석 결과, 노즐의 직경이 감소하면서 재순환 유동의 크기가 감소하고, 온도분포의 고온영역이 축소되면서 연료 노즐 로부터 떨어져 화염이 형성되는 경향을 확인하였다. 이로 부터 Cha와 Hwang은 강한 재순환 유동을 형성하는 것이 안정적인 연소 화염이 형성될 수 있음을 확인하였고, 연료 주입구 직경을 2 mm 이상으로 설정해야 함을 보고하였다.

Funke 등은 산업용 가스터빈에 적용할 목적으로 비예 혼합 타입의 연료 주입구 직경 0.84 mm를 가지는 GTCP36-300 APU를 이용하여 연소 특성을 관찰하였다[14]. 비교 군이 되는 참고문헌 15에서 사용한 항공용 연료 주입구 직 경 0.3 mm의 실험 결과와 비교하였으며[15], 0.84 mm의 노즐을 사용하게 되면, 연소기에서 발생하는 열 에너지의 총량을 나타내는 노즐당 열 에너지 출력(thermal power output)이 0.3 mm의 직경을 가진 노즐보다 약 390% 증가 한 것을 확인하였다. 또한 모든 작동 조건에서 NOx 배출 량은 4.0 ppm 미만이었으며, 화염 안정성에서도 비교군과 같이 소형 화염을 나타내는 것을 확인하였다. 직경 및 출 력의 증가에도 낮은 NOx 배출량과 화염 소형화를 이룰 수 있던 이유는 화염 고정 메커니즘의 인자인 전단층(shear layer) 및 연료-공기 주입으로 발생하는 재순환 영역으로 인해 공기역학적인 화염 안정화를 확보할 수 있으며, 적정



Fig. 3. Experimental results at an equivalence ratio of 0.4, normalized energy density of 6.7 MW/m²·bar[17].

운동량 플럭스(momentum flux) 비를 통해 NOx 발생량을 줄일 수 있음을 확인할 수 있었다[16].

비슷한 사례의 연구로 Ayed 등은 APU에 직경 0.3 mm 인젝터를 갖는 MM 버너를 적용한 실험를 통해 화염구조. 유동장 및 온도 분포를 분석하였다. 이를 통해 화염 주위 의 냉각 공기 흐름의 조절을 통해 특정 매개변수인 에너지 밀도 및 연료 분사 깊이(y) 와 임계 분사 깊이(y_{crit}) 그리고 blockage ratio(BR) 조절을 통해 NOx 배출량을 줄일 수 있 음을 관찰했다[17]. Fig. 3는 실험 결과 중 하나로 정규화 된 에너지 밀도 6.7 MW/m²·bar일 때 화염 구조와 NOx 배 출량을 확인할 수 있다. 전부하 조건의 설계점인 당량비 0.4에서 2 ppmV 미만의 NOx가 배출되었으며, 이를 통해 MM 버너의 성능을 입증하였다. 입증된 성능 결과는 고에 너지 밀도로 연소 되는 산업용 가스터빈에도 적용되었으 며, 제작 용이성을 고려하여 연료 주입구 직경 1.0 mm의 연소기를 설계하였다. 그 결과 고에너지 밀도 상태에서도 노즐당 열량이 11배 이상 증가되는 것과 낮은 NOx 배출량 을 얻는 결과를 보고하였다.

이 외에도 채널의 직경 변화에 따른 혼합 성능을 확인한 연구 사례도 보고된 바 있다. Chen 등은 예혼합 타입의 길 이 55 mm, 연료 주입구 직경 0.6 mm인 단일 MM 노즐을 기준으로 8.4 mm의 채널 직경을 0.2 mm씩 변경하여 혼합 성능을 확인하였다[18]. 채널 직경의 변화는 혼합 성능을 제어할 수 있는 연료와 공기 운동량 비(fuel-air momentum ratio; J)에 영향을 미치는데 직경이 증가함에 따라 운동량 비의 증가와 혼합을 도와주는 vortex 크기의 증가로 연료



Fig. 4. H₂ mass fraction distribution and velocity vectors of different channel diameters[18].

jet와 공기의 접촉을 촉진 시켜 혼합 성능이 향상되는 결과 를 보였다. 그러나 채널 직경 9.4 mm(J=24.13)일 때 혼합 성능이 크게 감소하는 것을 관찰하였는데, 이는 수소 질량 분율 분포를 나타낸 Fig. 4에서 확인할 수 있는 것처럼 채 널의 직경이 커짐에 따라 증가된 운동량 비의 영향으로 연 료 제트의 세기도 함께 강해지면서 연료가 공기 흐름을 통 과하여 채널 외벽 근처에서 혼합 영역을 형성하게 된다. 이 영향으로 연료 주입구 쪽의 수소 농도는 상대적으로 낮 아지게 되고, 공기 흐름과의 혼합 균일도가 감소 되는 것 을 확인하였다. 이를 통해 최적의 혼합 성능을 위한 최적 의 운동량 비(21.82≤J≤24.17)가 있음을 확인하였으며, 예혼합 타입의 노즐 채널 직경은 9.2 mm(J=23.49)일 때 최 적화된 혼합 성능을 가짐을 보고하였다.

위 연구 사례를 통해 연료 주입구 및 노즐의 채널 직경 변화에 따라 유동 특성이 달라지며, 이러한 변화는 운동량 비나 화염 고정 메커니즘 인자인 전단층(shear layer) 및 재 순환 영역 형성에 영향을 미침을 확인하였다. 혼합과 화염 형성에 있어 중요 인자인 연료 주입구 및 노즐 채널의 직경 은 예혼합 또는 비예혼합 타입의 노즐 설계 시 주요 변수로 고려해야 하며, 노즐에 맞는 최적 조건을 적용하는 것이 필요하다.

2.2.2 연료 주입구 형상에 대한 영향

교차 유동과 관련하여 원형 및 타원형 등 다양한 연료 주 입구 형상에 따라 연료와 산화제가 효과적인 혼합이 가능 한 연구 결과가 보고되고 있다. MM 연소 시스템 노즐의 경우 혼합 효율성과 연소 안정성 그리고 오염물질 배출제 어를 위해 원형인 연료 주입구 형상에 대해 주로 연구 되었 지만, 더 나은 혼합 성능과 배출 제어를 위하여 다양한 연 료 주입구 형상에 대하여 연구가 수행 중이다.

Chen 등은 원형 외에 예혼합 MM 연소 시스템에서 비원 형 연료 주입구에 대한 혼합 성능을 확인하고자 4개의 타 원형의 연료 주입구로 구성된 단일 노즐에 대해 연구했다 [19]. 연료 주입구의 형상이 타원형에 가까워질수록 연료 분사 초기에만 혼합 성능이 증가하는 것을 확인하였다. 연 료가 교차 유동 방식으로 분사될 때 공기 흐름과 함께 혼합 층을 형성하며, 유동 흐름의 변화를 주는 일종의 소스 (source) 지점과 와류(vortex)가 생성된다. 소스 지점은 연 료 주입구 형상이 타원형에 가까워질수록 연료 분사 방향



Fig. 5. Injector hole geometry impact on streamline and fuel distribution (reformed)[19].



Fig. 6. (a) Fuel injection concept diagram and (b) OH*-chem image of Quadruple flame structure[20].

의 근처에서 생성되며, 높아진 연료와 공기의 운동량 비로 인해 추가적인 와류가 생성되므로 연료 제트 흐름을 유지 하지 못해 혼합 성능이 저하된다. 관련 내용은 Fig. 5를 통 해 확인할 수 있으며, 연료 주입구 형상이 전단층 및 와류 등 혼합 성능과 유동 특성에 영향을 주는 인자임을 보고하 였다.

Choi 등은 연료 주입구의 위치 변경을 통해 발생하는 스 월(swirl)이 혼합에 영향을 미치는지 조사했다[20]. Fig. 6(a)는 분사 방법에 대한 개략도로 기존의 연료 주입구는 수직형으로 공기 흐름에 교차 유동 형태로 연료를 분사하 였다면, 연료 분사 거리를 반경 방향으로 조정한 후 접선 방향으로 분사하여 선회 유동을 형성하였다. Fig. 6(b)는 스월 형성의 영향으로, 분사 거리가 늘어남에 따라 하나의 화염이 4쌍의 작은 화염으로 분리되어 quadruple flame(QF) 구조가 되는 것을 보여준다. 분리된 화염은 화염을 소형화 시키고, dump 면에 고정되어 화염 안정성을 높이는 역할 을 하며 반응물의 체류 시간을 감소시킨다. 체류 시간의 감소는 NOx 배출량을 저감 시키는 역할을 한다. 실험을 통해당량비 0.66과 스월 수 0.1175 이상에서 소형 화염이 형성되고, NOx 형성에 영향을 미치는 반응물들의 체류 시 간이줄어듦과 동시에 NOx 배출량이 감소하는 것을 확인 하였다.

이와 비슷한 사례로 Lei와 Kandelwal도 분사 위치 변화 를 통해 발생하는 선회 유동을 활용하여 혼합 성능을 개선 하고, 연소 온도를 낮춤으로써 NOx 발생량을 30% 이상 개선되는 것을 확인하였다[21]. 또한, 기존의 챔버보다 40 mm 가량 길이를 축소할 수 있으며, 연소기의 소형화를 달 성하여 무게에 대한 부담을 줄여 항공용 연소기로 MM 연 소 시스템을 적용할 수 있음을 보고했다.

연료 주입구의 형상 변경이 아닌 채널의 형상을 변경하 여 혼합 성능과 NOx 배출량을 제어하고자 하는 연구도 진 행되었다. Murthy 등은 예혼합 MM 연소 시스템에서 주 로 사용되었던 원통형 채널이 아닌 디퓨저 형태의 채널을 제안하였다[22]. 발산 각도 3.7도를 가진 디퓨저 형태의 채널과 기존의 원통형 채널을 비교하였을 때, 디퓨저 형태 의채널에서 형성된 재순환 영역이 채널 출구 쪽으로 이동 되는 것과 대칭적인 대류 영역이 형성됨으로써 화염 안정 성 및 고정 능력을 확인하였다. 또한, 연소 시 원통형의 모 델보다 1900 K 이상의 고온영역이 적은 것을 확인할 수 있 는데 이는 열적 NOx 발생량이 최소임을 의미한다. NOx 배출량의 경우 원통형 채널보다 디퓨저 채널 형태가 약 80% 정도 더 감소됨을 보고하였다. 수소, 케로신, 메탄을 포함한 연료 혼합물에 대한 화염 안정성과 NOx 발생량을 조사한 Karakurt 등도 디퓨저 타입의 채널을 이용하였다



Fig. 7. The emissive performance of micro-mix combustion with hydrogen and methane[23].

[23]. 디퓨저 타입의 채널은 화염 안정화를 위한 디자인이 며, 인젝터 위치 조정을 통해 각 연료에 대한 화염 특성과 반경 방향 속도를 변경시켜 충분한 체류 시간을 통해 화염 을 고정 시키는 장점을 가지고 있다. 그리고 출구에서 재 순환 영역을 형성하여 원환형 흐름(toriodial flow)을 유지 함으로써, 수소와 메탄 연료의 MM 연소방출 특성 결과인 Fig. 7에서 확인할 수 있는 것처럼, 수소의 경우 희박 조건 인 당량비 0.2에서도 효과적인 연소 성능과 낮은 NOx 배 출량을 달성함을 보고하였다.

연료 주입구의 형상 변경이 아닌 채널의 형상을 변경하 여혼합성능과 NOx 배출량을 제어하고자 하는 연구도 진 행되었다. Murthy 등은 예혼합 MM 연소 시스템에서 주 로 사용되었던 원통형 채널이 아닌 디퓨저 형태의 채널을 제안하였다[22]. 발산 각도 3.7도를 가진 디퓨저 형태의 채널과 기존의 원통형 채널을 비교하였을 때, 디퓨저 형태 의 채널에서 형성된 재순화 영역이 채널 출구 쪽으로 이동 되는 것과 대칭적인 대류 영역이 형성됨으로써 화염 안정 성 및 고정 능력을 확인하였다. 또한, 연소 시 원통형의 모 델보다 1900 K 이상의 고온영역이 적은 것을 확인할 수 있 는데 이는 열적 NOx 발생량이 최소임을 의미한다. NOx 배출량의 경우 원통형 채널보다 디퓨저 채널 형태가 약 80% 정도 더 감소됨을 보고하였다. 수소, 케로신, 메탄을 포함한 연료 혼합물에 대한 화염 안정성과 NOx 발생량을 조사한 Karakurt 등도 디퓨저 타입의 채널을 이용하였다 [23]. 디퓨저 타입의 채널은 화염 안정화를 위한 디자인이 며, 인젝터 위치 조정을 통해 각 연료에 대한 화염 특성과 반경방향속도를 변경시켜 충분한 체류 시간을 통해 화염 을 고정 시키는 장점을 가지고 있다. 그리고 출구에서 재 순환 영역을 형성하여 원환형 흐름(toriodial flow)을 유지 함으로써, 수소와 메탄 연료의 MM 연소방출 특성 결과인 Fig. 7에서 확인할 수 있는 것처럼, 수소의 경우 희박 조건



Fig. 8. Principle of the micro-mixing cups[25].

인 당량비 0.2에서도 효과적인 연소 성능과 낮은 NOx 배 출량을 달성함을 보고하였다.

혼합 성능을 위해 새로운 노즐 형상을 개발하는 연구도 진행되었다. Fig. 8은 MM 연소 시스템으로 적용하기 위 한 캘리포니아 대학에서 개발한 micro-mixing cup 노즐이 다[24,25]. micro-mixing cups 기술은 예혼합 연소 유형으 로 낮은 연소 온도를 통해 NOx 배출을 감소시키는 기술이 며, 수소 연료 공급은 노란색, 주황색은 공기 공급 채널이 다. 공기는 컵의 가장 자리를 따라 선회 유동이 유도되면 서 수소와 혼합이 된다. micro-mixing cups 기술은 뛰어난 확장성과 5 ppm 미만의 낮은 NOx 배출량을 가지는 장점 을 가지고 있지만, 제조의 복잡성과 수소 연소에서 가장 중요한 문제인 역화에 있어 3 bar 이상의 가압 조건에서 역 화가 발생하는 단점을 가지고 있다.

연료 주입구 형상은 혼합 및 화염 안정화하는데 있어 영 향을 주는 인자임을 확인할 수 있었다. 혼합 성능은 와류 와 난류에 의해 향상됨을 확인할 수 있었으며, 재순환 영 역 또는 전단층의 형성과 화염을 소형화하여 반응물의 체 류 시간을 조절함으로써 화염 안정성과 NOx 배출 제어에 영향을 미침을 확인했다. 이는 앞서 확인했던 연료 주입구 의 직경 변화의 사례에서처럼 주입구 형상이 유동 특성에 영향을 주는 인자임을 알 수 있었으며, 노즐 설계 시 모델 에 맞는 최적화가 필요함을 확인할 수 있었다.

2.2.3 연료 주입구 개수에 따른 영향

MM 연소 시스템에서의 연료 주입구의 개수에 따른 연 소 성능과 NOx 배출의 영향을 확인하고자 수행된 연구도 다수 보고되고 있다. 신시내티 대학교의 CFRL(Combustion and Fire Research Laboratory)팀은 PIT(Porous Injection Technology)에 대한 연구를 통해 천연가스 및 합성 연료 에 대한 MM 연소 시스템의 인젝터를 개량하였다[26]. 기 존의 MM 연료 주입 방식과 달리 주입되는 연료 및 공기에 대한 운동량 플럭스 비를 고려하지 않고 자유류 상태의 공

출은 완전한 예혼합상태와 가까운 10 ppm 수준인 것을 확 인하였으며, Da 수가 10 이상이면, 혼합 불량으로 NOx 배 출량이 증가함을 확인하였다. 부가적으로, Da 수가 낮아 지면 연소 불안정성이 발생할 수 있으나, 반응성이 높은 수 소를 사용할 경우 불안정성이 발생하지 않으며, 100 ms 미 만의 최적화된 혼합 시간과 체류 시간을 적용한다면, 안정 적인 연소와 적은 양의 NOx를 배출할 것으로 보고하였다.

2.2.4 노즐 주위 Bluff body 및 Baffle의 영향

MM 연소 시스템의 특징은 소형 화염으로 반응물의 체 류 시간을 단축하여 NOx 배출량을 최소화 하는데 있다. 이때 연소기 설계자는 화염 안정성과 원하는 화염 길이를 고려해야 한다[28]. 특히 수소의 경우, 빠른 반응성으로 인 한 역화 가능성과 자동점화와 같1은 연소 특성으로 인해 화염 및 운용 안정성에 문제가 발생할 수 있어 bluff body 및 baffle을 사용해 불안정성을 조절한다. 부분 예혼합 MM 연소기를 연구한 Scmidt 등은 bluff body의 유무에 따 라 NOx 배출량을 비교하는 연구를 수행하였다[29]. Fig. 11은 bluff body 유무에 따른 혼합 성능과 속도장을 비교 한것으로, 교차유동형태로분사되는 수소노즐에 12 mm 직경을 가지는 원형의 bluff body를 장착함으로써 단면적 이 줄어들고, 수소가 공기 흐름으로 유도되면서 혼합 성능 이 향상되는 것을 확인하였다. 이는 bluff body가 재순환 영역을 생성함으로 부분적으로 발생할 수 있는 높은 온도 피크를 방지하고 화염 안정성을 향상 시켜, 기존의 노즐보 다 NOx 배출량을 40%나 저감 시키는 효과를 확인했다. 또한수소를 이용한 희박 예혼합 연소기 연구에서 각기 다 른 bluff body의 형상에 따라 다른 결과를 보이지만 모두 혼합 성능과 화염 안정성이 향상되는 것을 확인하였다 [30,31].

bluff body를 화염 고정 등 제어를 위한 방안으로 사용되 기도 한다. 아헨대학교에서는 MM 연소 시스템을 대규모

Without FB

FB = 12 mm

0.20 0.40 0.60

0.80



5.218

10.44 15.65

20.87 26.09

기 흐름에 넓은 표면적을 가지는 다공성 주입구를 통해 연 료를 주입하는 방식이다. Fig. 9는 개량된 MM 연소 시스 템을 나타낸다. 두 개의 블록으로 나뉘는데 하단 블록에는 공기가 주입되는 8개의 튜브로 구성되어 있으며, 상단 블 록은 연료가 주입되는 다공성 튜브와 60°의 각도로 구성 된 입출구로 되어 있다. 연료와 공기가 주입되면 상단 블 록의 인젝터 벽과 다공성 튜브 사이의 환형(annular) 공간 에서 혼합되어 연소하게 되는데, 기존의 교차 유동(crossflow)보다 혼합을 제어하는데 용이한 것으로 보고하였다. 연료와 공기의 혼합이 이루어지는 상단 부분은 각 노즐에 다공성 튜브와 직경이 같은 센터 바디를 두어 연료와 공기 의 혼합 통로를 구성하게 되는데, 혼합 통로를 고려한 최 적 인젝터 직경(D₁)은 다공성 튜브의 직경(D) D₁=√2D일 때, 그리고 혼합물이 형성되는 상단 블록의 길이(L₁)는 D₁ 의 6배일 때 가장 최적화된 혼합 성능을 얻을 수 있음을 확 인했다. 최적 조건에서 배기가스 NOx 배출량은 4 ppm 이 하였으며, 각 인젝터들을 모아 연소기로 구성하였을 때, 각각의 인젝터가 독립적으로 작동 가능함에 따라 디자인 확장성을 장점으로 보고하고 있다.

Fig. 10은 Landry-blais 등이 인젝터 70개와 105개로 구 성된 비예혼합 타입의 MM 연소기에 대해 수소와 천연가 스를 적용한 화염 구조를 보여준다[27]. 수소와 천연가스 의 경우 Da(Damkohler number)가 10 이하이면, NOX 배



Fig. 9. Shematic of the micromixer injector with PIT[26].



Fig. 10. (a) Experimental nozzle and flame structure (b) Hydrogen, (c) Natural gas[27].



Fig. 12. Domain of a micro combustion with baffle plate[34].



Fig. 13. Multi-nozzle (tube) micromix combustor concepts, (a) NASA, (b) Hitachi, (c) Paker Hannifin, (d) GE Gas Power[35].

산업용 가스터빈으로 확장하기 위해 에너지 밀도에 따른 연소 효과를 확인했다[32]. 공기 흐름을 유도하는 패널의 설계에 따라 화염을 고정하는 재순환영역의 위치와 그에 따른 NOx 발생량의 변화를 관찰하였다. bluff body의 적 용은 혼합 성능 향상 및 NOx 배출 제어 뿐만 아니라 화염 고정 또는 분리가 가능하도록 제어할 수 있음을 확인하였 다. 혼합 성능을 높이기 위해 baffle을 사용하기도 한다.

baffle은 bluff body와 같이 재순환영역 및 유체 흐름의 와류(vortex)를 형성하여 혼합 성능을 높이지만, 연료 노 즐 또는 연소기 내부에 별도로 장착해주는 장치이므로 bluff body와는차이가 있다. 기존의 baffle 판의 경우 원형 의 홀(hole)로 구성이 되어 연구되었다면[33], 비원형을 채택하여 연구를 진행한 사례도 있다. Kim과 Park은 Fig. 12처럼 baffle 판에 원형과 더불어 사각형과 삼각형의 흘 을 이용하여 혼합 및 연소 효율을 확인하였으며, 기준이 되는 원형 baffle보다 비원형 흘이 강한 재순환영역을 형 성하여 연소 효율이 향상되는 결과를 확인했다[34].

bluff body와 baffle은 혼합 성능을 증대시킬 수 있으며, 화염 제어에 있어서도 효과적이다. 복잡한 형상과 제작이 MM 연소 시스템에 적용하는데 있어 어려움이 있을 수 있 으나 연소 성능이나 제어를 위해서 고려할 수 있다.

2.3 Multi-nozzle Micromix combustor

본 절에서는 MM 원리가 적용된 다수의 단일 노즐들을 하나의 연소기로 통합한 복수 노즐형(Multi-nozzle) MM 연소기에 대해 소개하고자 한다. Fig. 13은 개발 또는 연구 중인 복수 노즐 MM 연소기들의 개념을 보여준다[35]. NASA, Hitachi, Paker Hannifin 그리고 GE에서 MM 연소 시스템을 적용 개발 중인 연소기들로 앞서 확인한 인자들 을 최적화하여 수소 전소 및 혼소에 대한 실험을 진행하였 다. 단일 노즐들의 통합인 복수 노즐형 MM 연소기는 연료 유연성과 역화 방지가 용이하고, 연소 성능에 영향을 미치 지 않고 다양한 크기의 연소기를 설계할 수 있다는 장점이 있어, 차세대 가스터빈 엔진에 수소를 적용할 목적으로 개 발 중에 있다.

개별로 운용되는 노즐의 개수 변화가 미치는 영향에 대 해서 연구를 진행한 Hasemann 등은 동축 유동(co-flow) 형식의 단일 노즐을 6개와 12개의 노즐로 구성된 연소기 의 비교 실험을 진행하였다[36]. 혼합 영역 채널의 직경과 길이, 연료 분사 직경 등 동일한 조건이 적용된 노즐을 이 용하여 실험을 진행한 결과, 노즐 개수를 2배로 늘렸을 경 우, CO 배출이 약 10 ppm 이상 감소함을 확인하였으며 NOx 배출량 역시 저감되는 것을 확인하였다. 이는 노즐의 개수가 많아지면서 공기와 연료의 혼합 성능이 향상되는 데, 노즐 유동으로부터 형성되는 전단층이 연소기의 벽쪽 으로 편향되어 연소실 내부의 뜨거운 배기가스와의 혼합 을 증가시키기 때문이다. 이로 인해 12개의 노즐 구성이 6 개의 노즐 구성보다 혼합 시간이 더 짧지만, 낮은 CO 및 NOx 배출량을 가지게 된다. 또한, 적용된 노즐이 많을 경 우, 화염 위치가 노즐 출구면에 더 가깝게 부착되면서 연 소효율이증가하고, 동시에 화염이 소형화되어 NOx 형성 의 매개변수 중 하나인 반응물의 체류 시간이 짧아져 긍정 적인 효과가 있음을 보고했다. Liu 등은 중앙의 1개 노즐 과 6개의 노즐이 육각형의 벌집 모양으로 배치된 연소기 에 수소와 메탄의 혼합연료를 사용하여 배출 특성을 확인 하였다[37]. 단열 화염온도 1920 K 조건에서 수소함량이 60%를 초과하지 않는 경우, 10 ppm 이하의 NOx와 6 ppm 이하의 CO가 배출이 되는 것을 보고하였다. 또한 실험을 진행한 모든 조건에서 역화 위험과 화염 안정성을 방해하 는 연소 진동이 발생하지 않는 결과를 얻었으며, 설계된 복수 노즐형 MM 연소기의 활용 가능성을 확인하였다. 동 시에 높은 수소 함량 조건에서는 화염 안정성을 위해 노즐 간의 거리와 열적 부하에 대한 영향을 분석하는 등 추가적 인 실험의 필요성을 보고하였다.

Xing 등은 1.15 MW급의 H-class의 가스터빈에 역화 방 지를 위해 연구한 테이퍼형 MM 노즐 40개를 적용한 prototype MM 연소기를 개발하였다[38]. 해당 연구에서 40개의 노즐은 연소 가스 온도의 균일성 향상과 NOx 제어 를 위한 목적으로 4개의 그룹으로 나뉘어 배치되었다. 연 료 온도 473 K에서 prototype MM 연소기는 99.99%의 연 소효율과 13.55 ppm의 낮은 NOx 배출 등 우수한 연소 성 능을 보였다. 또한 Liu 등은 MILD 연소기와 복수 노즐형 MM 연소시스템의 비교실험을 통해 복수 노즐형 MM 연 소기의 잠재력을 확인하였다[39,40]. 직경 5 mm, 길이 10 mm의 microscale 노즐 24개가 배열된 복수 노즐형 MM 연소기는 혼합 영역, 역화 방지 영역, 가스 분배 영역으로 구성되어 있다. 수소와 메탄 혼합물을 사용하여 수소함량 의 변화(0~40%)에 따른 비교 실험 결과, 수소함량 40% 일 때 복수 노즐형 MM 연소기가 MILD 연소기보다 안정적 인 연소를 유지하기 위한 음향 한계(acoustic limit)과 희박 화염 날림(lean blowout, LBO)의 한계가 380%로 확장되 는 우수한 연소 안정성을 보였다. 하지만 MILD 연소기와 비교하여, 복수 노즐형 MM 연소기에서 NOx 배출량이 약 2 ppm 높은 것으로 보이는데, 이는 MILD 연소기의 특성 인 연소기 내부에서의 무화염 연소 상태를 유지하는데 필 요한 배기가스의 재순환으로 인해 약간의 차이가 발생한 것으로 확인된다. 그러나 복수 노즐형 MM 연소기 또한 전 반적으로 10 ppm 이하의 낮은 배출량이 확인됨으로써 연 소 안정성과 더불어 배출제어에도 효과적인 것으로 입증 되었다. 또한, 40% 이상 고농도의 수소를 연료를 사용할 경우 복수형 노즐 연소기의 안전성을 고려하여 역화 방지 를 위해 최소 화염 부상 거리를 제시하였으며, 단일 microscale 노즐 내경의 1.6배 이상의 화염 부상 거리를 가져야 복수형 노즐 MM 연소기를 제작 시, 역화로부터의 연소기 안정성 및 낮은 NOx 배출량 그리고 높은 연소 성능을 가 질 수 있음을 보고하였다.

 Fig. 14는 NASA에서 개발한 Glenn multi-tye LDI N1

 연소기로 길이 6.35 mm 튜브와 연료 주입구 직경 0.508



Fig. 14. NASA Multi-tube assembly and injection tested : (a) NASA N1 multi-tube and modified configuration (b) C1, (c) C2, (d) C3 and C4[11,41].

mm로 구성된 단일 노즐 25개로 구성되어있다[12,42]. Fig. 14(a)의 N1은 교차 흐름 형식으로 수소를 180° 간격 으로 위치한 연료 주입구에서 분사하여 짧은 혼합 영역을 생성하도록 설계되어 있다. Fig. 14(b)의 C1 구성은 로켓 엔진의 분사 기술을 기반으로 중앙에 "+" 모양 수소를, "+" 모양 주위로 여덟 개의 각도로 공기를 분사하도록 설 계되었다. Fig. 14(c)의 C2의 구성은 N1 인젝터와 설계는 유사하지만, 원형 대신 삼각형으로 구성되어 있는 차이점 이 있다. 삼각형 각 변의 가장자리에서 수소를 분사하는 데, 이는 NI과 동일한 공기 흐름 영역을 유지하면서 요소 의 패키징을 극대화할 수 있는 개념이다. 이를 이용하여 삼각형이 크기를 줄이게 되면 추가적인 수소 분사 지점을 만들어공기유동흐름에수소첨가를증가시킬수있고혼 합을 촉진할 수 있는 장점을 가진다. Fig. 14(d)의 C3와 C4 는 현재 이용 중인 가스터빈 기술을 접목한 디자인으로 C4는 각 홀의 중앙에 단일 수소 노즐을 사용하고, 대량의 선회유동을 발생시킴으로써 혼합을 생성한다. C4의 구성 은C3를기반으로하지만중앙홀을4방향의방사형수소 유동으로 대체되는 차이점이 있다. 수소 가스터빈 엔진의 잠재력을 탐색하기 위한 방안으로 시작된 LDI(lean direct injection) 구성의 4가지 디자인에 대해 시험을 한 결과, 성 능이 우수하며 안정성을 확인하였다. 또한, 낮은 수준의 NOx 발생량과 역화 및 자동점화 등 연소 불안정성과 관련 된 현상이 발생 되지 않는 것을 확인하였다. C4 디자인의 경우, 다른 디자인들에 비해 당량비 0.3보다 낮은 당량비 에서도 NOx와 내구성이 가장 우수함을 확인하였다. 이를 통해 MM 방식과 선회 유동 형성이 화염 안정성 등 연소 성능과 NOx 배출 제어에 있어 용이한 것으로 보고되었으 며, 고출력 터빈 연소기로 구현할 수 있어 MM 연소 시스 템의 잠재력을 확인하였다.

Fig. 15는 아헨대학교의 Funk 등은 예혼합 연소기의 문 제점인 자동점화 및 역화의 위험을 방지하고 연소 안정성 과 NOx 생성을 최소화하기 위하여 비예혼합 MM 원리를 적용하여 개발한 연소기를 보여준다[14-17]. MM 연소기 는 버너의 주요 단면에 균일하게 분포된 매우 소형화된 확



Fig. 15. GTCP36-300 APU micrommix combustor and test rig[14].

산 화염으로 구성된다. 이 소형 화염은 연소 영역에서 반 응물의 체류 시간을 줄여 NOx 배출량을 낮게 조절하며, 교차 유동 방식으로 설계되어 혼합 공정을 향상 시킨다. 특히 화염 고정은 NOx 배출 특성에 있어 큰 영향을 미치 는데 이를 제어하기 위하여 MM 버너 구조 내 재순환 구역 및 와류에 영향을 미치는 교차 유동의 운동량 플럭스 비를 최적화시키는 것이 중요한 것으로 보고하였다. 1600개의 소형 인젝터로 구성된 환형의 연소기는 에어버스 A320 같은 다양한 항공기의 보조 동력 장치(Auxiliary power unit; APU)인 GTCP36-300에 적용하기 위해 개발되었으 며[9], 항공기 외에 산업용의 가스터빈에도 적용을 위해 에너지 밀도를 높이는 실험도 진행했다. 여러 실험 조건 및 수치해석을 통한 연구 결과, 역화에 대한 강점과 수소 연소에 있어서 안정성을 입증할 수 있었으며, 특히 노즐 직경 0.84 mm일 때 최적화된 연소 챔버의 설계가 도출되 었다. 개발초기의 0.3 mm 설계와 비교시노즐당 열출력 은 약 390% 증가와 99% 이상의 연소 효율 및 4 ppm 이하 의 낮은 NOx 배출량을 보이면서 MM 연소기가 차세대 가 스터빈의 연소기로서의 가능함을 입증하였다[15,42,43].

2.4 Micromix combustion instabilities

연소 불안정성은 연소 과정에서 불규칙하거나 예측할수 없는 진동(oscillation) 또는 열음향학적(thermoacoustic) 영향으로 인해 발생된다. 이러한 연소 불안정성을 제어되 지 않는 상태로 두면 구성요소 진동, 열 전달 속도 증가, 화 염분출(blow-off) 그리고 역화와 같은 결과를 초래할 수 있다. 시간이 지남에 따라 진동은 엔진의 작동 범위를 제 한하면서 상당한 시스템 성능 저하 및 구조적 손상으로 이 어지는 최악의 상황에 직면하게 된다.

Lee 등은 축소된 산업용 GE7EA 가스터빈 부분 예혼합 연소기를 사용하여 메탄-수소 합성가스 화염에 대한 self-excited 열 음향 불안정성에 대해 연구했다[44]. 연료 열량 40 kW 및 50 kW에서 운용되는 연소기에 혼합연료 수소 첨가를 0~100% 사이로 변화를 주어 확인하였다. 40 kW 조건에서 수소함량 30~80% 사이일 때 고주파 연소 불 안정성이 발생하였으며, 50 kW로 증가시키면 연소 진동 의 강도가 증폭되는 동시에 연소 불안정성을 유발하는 수 소함량 범위가 약 5~100%까지 확장됨을 확인했다. 연료 의 수소함량이 증가함에 따라 고주파수 음향 모드가 활성 화되는 것을 관찰하였고, 고주파수 불안정성의 여기를 포 함한 연소기의 고유 주파수 사이의 모드 전환이 촉발될수 있음을 확인하였다.

Wicksall과 Agrawal은 예혼합 연소기를 이용하여 다양 한 단열 화염 온도 범위에서 수소함량이 최대 40%로 혼합 되는 메탄-수소 연료에 대한 연소 불안정성을 실험적으로 연구했다[45]. 대기압 조건에서 진행된 실험을 통해 수소 함량이 증가 될수록 연소기가 열 음향적으로 불안정함을 관찰하였다. 수소 혼소에서 수소함량의 증가는 동적 불안 정성 영역이 더 낮은 당량비로 이동되도록 하며, 이에 따 라화염의 위치와 속도의 변화를 통해 연소기의 열 음향특 성이 변경될 수 있음을 확인하였다.

Lee와 Kim은 60개의 복수 노즐로 구성된 MM 연소기 를 이용하여 희박 예혼합 수소 전소 화염과 메탄 화염사이 의 화염 역학의 주요 차이점을 확인하기 위해 self-excited 연소 불안정성을 조사하였다[46]. 200°C의 입구 온도와 유속이 25 m/s 고정된 조건에서 99.9% CHa와 99.9% Ha 의 화염에 대해 연구하였다. 연소기 길이 변화에 수소 화 염은 1 kHz의 고주파수 불안정성을 포함하여 여러 고차의 음향모드가 활성화되는 것을 확인하였으며, 메탄 화염의 경우 310 Hz 이하의 저주파 모드에서만 불안정성을 나타 내며 수소 화염에 비해 상대적으로 낮은 진폭을 보였다. OH PLIF 화염 이미지인 Fig. 16(a), (b)는 두 화염이 극한 주기 진동 동안 극도로 다르게 진동함을 보여준다. 수소 화염은화염간의상호작용없이연소기출구근처에서개 별적으로 진동하지만, 메탄 화염은 하나의 대규모 전역 진 동을 형성하기 위해 버섯 모양처럼 합쳐져 진동하는 것을 관찰하였다. 이러한 분석을 통해 MM 타입의 인젝터 배열 에서 희박 예혼합 수소-공기 화염의 행동 패턴을 설명하고 자발적 불안정성의 발생 맵핑을 수행하였다.

Cao 등은 수소 전소 MM 연소 시스템에서 증기 희석이 화염 주파수와 진동 특성에 미치는 영향을 조사하였다 [47]. MM 버너는 8개의 연료 주입구와 튜브 내벽의 24개 의 사선 주입구에서 산화제와 희석제가 주입되며, 스월 수 0.5, 출구 속도 55 m/s 그리고 레이놀즈 수 20,000 고정 조 건에서 화염 불안정성 특성에 대한 당량비와 증기 희석비 의 영향을 확인했다. FAZ(flame arm zone)에서의 진동 주 파수 스펙트럼 분석 결과, 당량비의 증가가 열 방출 및 고



Fig. 16. OH* chemiluminescence images for (a) hydrogen and (b) methane flames at a constant adiabatic flame temperature of 1881 K (reformed) [46].

조파(harmony) 주파수 강도에 영향을 주며, 이러한 영향 은 열 방출 영역이 blue-shift 됨과 동시에 화염 길이의 연 장으로 주파수가 저주파 영역으로 이동하게 된다. 또한증 기 희석비의 증감은 진동의 강도와 위치에 영향을 주며, 희석비 25%일 때 주기적인 열 음향 진동이 쉽게 발생함을 확인하였다. 스펙트럼 분석 외에 불안정성의 성장을 확인 하기 위해 실시한 DMD(dynamic mode decomposition) 비교 분석 결과, 열 음향 진동이 발생하는 저주파수 영역 에서의 화염구조가 일관된 모습임을 확인하였으며 당량 비 및 희석비에 따른 FAZ에서의 진동 위치와 강도 변화를 확인한스펙트럼 분석 결과와 일치함을 보였다. 이를 통해 당량비와 증기 희석이 MM 연소에 미치는 진동 특성과구 조를 확인할 수 있었으며, 주파수 스펙트럼 분석 방법과 DMD 방법이 연소 불안정성을 보다 정확하게 분석 가능 함을 입증했다.

McClure 등의 연구에서는 교차 유동 방식을 적용한 노 즐을 사용하여 수소 전소 MM 확산 화염의 강제 반응을 수 치적인 방법으로 연구했다[48]. 정상 상태 RANS 해석을 통한 FTF(flame transfer function) 결과, 2,000 Hz 이상의 매우 높은 주파수까지 FTF 이득이 실질적으로 감소하지 않음을 확인했다. 이는 천연가스를 연소하는 기존의 희박 예혼합 연소기의 일반적인 FTF 관측과 차이가 있으며, 수 소 화염이 더 넓은 범위의 주파수에 걸쳐 열 음향 진동을 증폭할 수 있음을 확인하였다. 또한 수소 MM 연소기가고 주파 연소 불안정성에 있어 더욱 취약할 수 있음을 보였 다. 수소 전소를 목적으로 한 MM 연소기 운용은 높은 주 파수의 연소 불안정성을 유발할 수 있는 잠재력이 있으며, 연소 진동을 완화하는 방법을 강구하지 않으면 연소기 하 드웨어 에 피해를 초래할 수 있음을 지적했다[49].

3. Micromix 연소기 실용 사례

본 절에서는 가스터빈 제조사들이 MM 연소 시스템을 적용한 연구개발 사례들을 소개하고자 한다.

Fig. 17은 MITSUBUSG-HITACHI에서 개발 중인 멀티 클러스터(multi-cluster) 연소기이다. 역화 방지와 연료 유 연성을 확보하기 위해 개발된 멀티 클러스터 연소기는 동 축 또는 교차 유동이 되도록 일정 수의 연료 노즐과 산화제 주입구를 가지는 클러스터들로 구성되어 있다[50,51]. 중 앙에 파일럿 버너가 있고 그 주변으로 6개의 메인 버너로 구성된 연소기는 파일럿 버너에 초기 점화를 유지하기 위 한 기름 또는 합성 가스가 분사되며, 메인 버너는 연료가 중앙에 위치한 상태에서 산화제인 공기가 분사되어 선회 유동을 형성한다. Fig. 17(b)는 메인 버너의 개략도와 중심

선을 따라 압력 프로파일과 연소기의 형상을 나타낸 것이 다. 선회유동을 형성하는 다공판(perforated plate)이 축소 -확산형상으로 설계됨에 따라 축소 형상에서의 유동은 선 회 반경이 감소됨에 따라 회전 속도가 증가되면서 유리한 압력 구배를 유발하고, 확산 영역의 유동은 선회 속도의 감소로 인해 역압력 구배를 유도한다. 이러한 역압력 구배 가 연소 가스의 재순화을 유발하는 역할을 한다. 결과적으 로 메인 버너의 각각의 클러스터는 Fig. 17(a)와 같이 부상 된 원뿔 형상의 화염을 형성하여 역화 방지와 NOx 제어에 이점이 있음을 확인하였다. HITACHI의 연소기는 예혼합 연소의 장점과 역화 방지 및 확산화염의 장점을 결합한 연 소기로 시험 결과 10 ppm 미만의 낮은 NOx 배출량을 유 지할 수 있었으며, 수소의 함량이 높아질수록 더 나아진 성능을 보임을 보고하였다. 현재 HITACHI의 연소기는 수소함량 30% 혼소 실험을 실증 완료하였으며, 수소 전소 를 위한 실증 실험을 진행할 예정이다.



Fig. 17. (a) MITSUBISHI-HITACHI multi-cluster combustor and (b) Schematic view of main burner[50,51].



Fig. 18. Micromix multi-point injector with separate primary and secondary[52].



Fig. 19. GE multi-pipe system DLN 2.6e combustor and photograph of small multi-pipe mixer for high-hydrogen fuel[53].

Fig. 18은 Parker Hannifin과 Georgia Tech의 공동 연구 로 개발한 MM 연소 시스템이 적용된 희박 예혼합 가스터 빈의 multi-point 인젝터이다[52]. 수소 및 혼합가스를 위 한 것으로 1차 주 모듈(primary module)에는 7개의 믹싱 컵으로, 2차 모듈(secondary module) 모듈에는 12개의 믹 싱 컵으로 구성되어 있다. 희박 조건에서의 운용성능을 향 상을 확인하고자 실시한 주 모듈과 2차 모듈의 단차를 둔 실험 결과, 연료 흐름의 단계별 분사 구분과 주 모듈 보호 기능을통해 화염의 안정성이 향상됨을 확인하였다. 또한, 연소 제어 시스템에 피에조 밸브 기술을 도입하여 고대역 폭인 500 Hz에서의 운전 가능한 연료 밸브 시연을 통해 동 적 안정성을 향상시켰다. 피에조 밸브 기술 도입이 화염 역 학, 열방출, 음향특성에 변화를 줄 수 있음을 입증하였다. Fig. 19는 GE에서 설계한 DLN 2.6e multi-pipe mixer system 연소기와 수소함량의 차이에 따른 연소 형태를 보 여준다. 산화제인 공기가 병렬로 배열된 여러 개의 채널을 통해 흐르게 되고, 연료 플레넘이 채널을 둘러싼 형태의 이 연소기는 연료인 저탄소 혼합가스를 교차 유동 혼합 방 식을 활용하여 방사형으로 주입된다[8,53]. LDI(Lean direct injection)와 유사한 디자인이지만, 연료 노즐 내부 에수소와질소등혼합을위한예혼합영역이있다는차이 점이 있다. 튜브 내 공기 속도는 혼합물의 화염 속도보다 높게 설정하여 고 수소함량의 혼합물에서도 역화의 위험 을 방지할 수 있으며, multi-pipe mixer의 짧은 길이와 직 선 흐름 경로로 인해 3.5% 정도의 낮은 압력 강하로 운전 안정성을 달성할 수 있는 것으로 보고되었다. multi-pipe mixer로 구성된 full-can 형식인 DLN 2.6e 버너는 H급(수 소함량 50% 혼합가스) 및 F급(수소함량 60%-질소 40% 혼합가스) 조건의 가스터빈 환경에서 시험을 통해 오염물

질배출면에서 매우 우수한 성과를 보였다. F급 조건의 환

경시험에서는 NOx 배출량이 10 ppm 이하임을 확인했으



Fig. 20. M1A-17 Micromix combustor of KHI[54].

며, 추가적인 질소를 20% 추가할 경우 3 ppm 이하의 NOx 수준을 보고하였다. 또한, 90%의 수소함량을 가지는 고농 도 수소 연료를 사용하여 100시간 이상의 운용 실험을 통 해 안정성도 확보하였다. 이를 통해 교차 유동 방식의 혼 합이 고농도의 수소 연료를 사용하는 연소기에 적합함을 확인하였고, multi-pipe mixer 시스템 연소기가 저 NOx 제 어에 용이하고, 고급 가스터빈 시스템에서 수소를 연소 시 키는데 효과적임을 입증하였다.

Fig. 20은 KHI(Kawasaki Heavy Industries)의 M1A-17 가스터빈 연소기를 보여준다. LDI 형식의 예혼합 방식을 사용한 다른 제조사와 다르게 M1A-17은 확산 화염을 이 용한 비예혼합 형식의 연소기이다[54]. M1A-17 연소기 는세계 최초로 100% 수소 연료 가스터빈 실증을 일본 고 베에서 성공적으로 마친 연소기로써 아헨대학교의 MM 원리가 적용[14-17]되었다. jet in cross-flow 구성으로 공 기 흐름에 수직으로 수소가 주입되며, 혼합물이 형성하는 내부 및 외부에 형성된 재순환 영역에 의해 화염이 안정적 으로 고정이 된다. 화염 모양과 길이 그리고 NOx 생성에 영향을 미치는 매개변수인 공기 유동의 blockage ratio와 연료 흐름 내부로의 침투 깊이를 이용하여 화염을 소형화 시키고, 미세 화염 영역에서 반응물의 짧은 체류 시간을 유도해 낮은 NOx 배출량을 보여준다. 공개된 정보에 따르 면, M1A-17는 1.1 MWe의 전력을 공급하고, 약 2.8 MWt 의 사용 가능한 열 전력(thermal power)을 가지며, 27%의 전기 효율을 가지고 있음을 보고되고 있다. 실증간 모든 작업 부하에서 M1A-17은 20 ppm의 낮은 NOx 배출량을 유지함으로써 MM의 가능성과 확장성을 확인하였으며, 수소 가스터빈 적용에 있어 효과적임을 보고했다.

4. 결 론

본 연구에서는 수소 또는 수소 기반 혼합 가스가 적용된 MM(micromix) 연소 시스템의 설계 개념이 연소 특성 및 버너 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 주요 형상 설계 인자가 MM 연소기에 미치는 영향을 분석하고, 실제 시스 템에 적용하기 위한 연구 사례와 MM 연소 시스템에서 발 생할 수 있는 연소 불안정성에 대해 조사하였다.

MM 연소기의 최적 성능을 위한 설계 인자들에 대한 연 구는 주로 혼합 성능과 화염 안정화, 오염물질 저감을 목 적으로 진행되었다. 대부분의 연구에서는 1 mm 이하의 연료 주입구 직경을 적용하고 있으며, 0.3~1.0 mm 사이의 직경이 최적 혼합 성능과 수 ppm 수준의 저 NOx 배출 결 과를 갖는 것으로 나타났다. 여기에 타원 형상의 연료 주 입구나 디퓨저 형상의 채널을 적용하는 것도 NOx 배출을 저감하는데 도움이 되는 것으로 보고되었다. 연료 주입구 의 개수 역시 화염 안정성과 NOx 저감에 영향을 미치지 만, 개수의 영향보다는 연료와 공기의 혼합 시간이 NOx 저감에 직접적인 영향을 주는 것으로 확인되었다. 높은 반 응성을 가지는 수소 연소 시, 100 ms 미만의 혼합 시간을 적용하는 것이 화염 안정성과 최소 NOx 배출을 위해 적절 한것으로 파악된다. 이 외에도 bluff body 및 baffle도 재순 환 영역과 전단층 형성을 통해 효과적인 혼합 성능과 화염 안정화에 도움이 되는 것으로 확인된다. 이러한 MM 노즐 들을 통합한 복수 노즐형 MM 연소기들은 가스터빈 연소 기에 적용하는 것이 가능하며 다양한 형상의 연구 사례가 보고되고 있다. MM 연소기술에서의 연소 불안정성에 대 한 연구는 연소기에서 발생할 수 있는 진동 특성 및 구동 메커니즘을 파악하는데 중점을 두었다. 수소의 연료 특성 상당량비와 증기 희석비 등 매개변수의 영향으로 화염구 조 변화와 저주파부터 고주파까지 다양한 주파수 영역에 서의 연소 불안정성을 확인했으며, 보다 정확한 분석을 위 한 주파수 스펙트럼 분석 외에 DMD 분석 등 다양한 분석 방법을 적용한 연구가 진행 중이다.

MM 연소 시스템에서의 다양한 형상 인자들은 유동 특 성에 큰 영향을 미친다. 운동량 비에 따른 재순환 영역, 전 단층 그리고 와류 등의 변화가 혼합 성능 및 화염 안정성, NOx 제어에 관여하는 것으로 나타난다. 이러한 요소는 화 염 소형화와 짧은 반응물의 체류 시간 등을 유도함으로써 화염 및 운용 안정, 낮은 NOx 배출량에 기여하며, 동시에 수소 연소의 문제점인 역화 및 자동점화 등을 효과적으로 방지할 수 있다. 또한 연소 불안정성에 대한 구동 메커니 즘의 확보 등 이상의 연구 결과들로 하여금 연소기의 설계 용이성과 연료 유연성 및 기존의 가스터빈 엔진과의 호환 성 등의 장점을 보이며, 실제 연소기에 적용될 수 있는 가 능성을 보이고 있다.

에너지 수요와 환경오염이라는 문제 대응에 수소 가스 터빈은 큰 대안이 될 것으로 예상되며, MM 연소 시스템은 수소 연료 적용에 있어서 가장 적합한 기술 중 하나로 평가 되고 있다. 향후, 국내에서도 비예혼합 타입을 포함하여 다양한 인자들에 대한 지속적인 연구와 함께, 실용적인 적 용 방법에 대한 고민이 필요할 것으로 생각된다.

후 기

본 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연 구재단 미래우주교육센터사업(NRF-2022M1A3C2085157) 의 지원으로 작성되었습니다.

References

- U.S Energy Information Administration (eia). International Energy Outlook 2021 (IEO2021), eia, U.S. Department of Energy, Washington, DC, USA, 2021; https://www.eia.gov/ieo.
- [2] H. Kim, U. Jin, Y. Go, M. Choi, I. Gu, M. Baek, K.T. Kim, D. Shin, A Review of Carbon Neutral Gas Turbine Combustion Technology, J. Korean Soc. Combust., 27(2) (2022) 14-38.
- [3] Korea Energy, Paradigm Shift in Power Generation: Hydrogen Gas Turbine, Korea Energy Newspaper, http://www.koenergy.co.kr/news/articleView.html ?idxno=109730, (June 9, 2020).
- [4] D. Kim, Review on the Development Trend of Hydrogen Gas Turbine Combustion Technology, J. Korean Soc. Combust., 24(4) (2019) 1-10.
- [5] A.H. Lefebvre, Fuel effects on gas turbine combustion-liner temperature, pattern factor, pollutant emissions, J. Aircr., 21(11) (1984) 887-898.
- [6] J. Ziemann, F. Shum, M. Moore, D. Kluyskens, D. Thomaier, N. Zarzalis, H. Eberius, Low-NOx combustors for hydrogen fueled aero engine, Int. J. Hydrogen Energy., 23(4) (1998) 281-288.
- [7] J.B. Heywood, T. Mikus, Parameters controlling nitric oxide emissions from gas turbine combustion, In: 41st Meeting on Atmospheric Pollution by Aircraft Engines, England, London, 1973.
- [8] W.D. York, W.S. Ziminsky, E. Yilmaz, Development and testing of a low NOx hydrogen combustion system for heavy duty gas turbines, in Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, vol. 44687: American Society of Mechanical Engineers, (2012) 1395-1405.
- [9] G. Dahl, F. Suttrop, Engine control and low-NOx combustion for hydrogen fuelled aircraft gas turbines, Int. J. Hydrogen Energy., 23(8) (1988) 695-704.
- [10] N.T. Weiland, T.G. Sidwell, P.A. Strakey, Testing

of a hydrogen diffusion flame array injector at gas turbine conditions, Combust. Sci. Technol., 185(7) (2013) 1132-1150.

- [11] C. Marek, T. Smith, K. Kundu, Low emission hydrogen combustors for gas turbines using lean direct injection, 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE joint propulsion conference & exhibit, (2005) 3776.
- [12] A. Araoye, A. Abdelhafez, R. Ben-Mansour, M. Nemitallah, M. Habib, On the quality of micromixing in an oxy-fuel micromixer burner for gas turbine applications: A numerical study, Chem. Eng. Process., 162 (2021) 108336.
- [13] C.L. Cha, S.S. Hwang, Numerical study on combustion characteristics of hydrogen gas turbine combustor using cross flow micro-mix system, J. Korean Soc. Combust., 24(3) (2019), 17-25.
- [14] H.W. Funke, N. Beckmann, S. Abanteriba, An overview on dry low NOx micromix combustor development for hydrogen-rich gas turbine applications, Int. J. Hydrogen Energy., 44(13) (2019) 6978-6990.
- [15] H.W. Funke, E. Recker, S. Börner, W. Bosschaerts, LES of jets in cross-flow and application to the micromix hydrogen combustion, in Proceedings of the 19th International Symposium on Air Breathing Engine, Montreal Canada, 2009.
- [16] H.W. Funke, S. Börner, J. Keinz, K. Kusterer, D. Kroniger, J. Kitajima, M. Kazari, A. Horikawa, Numerical and experimental characterization of low NOx Micromix combustion principle for industrial hydrogen gas turbine applications, in Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 2012, vol. 44687: American Society of Mechanical Engineers, 1069-1079.
- [17] A.H. Ayed, K. Kusterer, H.W. Funke, J. Keinz, C. Striegan, D. Bohn, Experimental and numerical investigations of the dry-low-NOx hydrogen micromix combustion chamber of an industrial gas turbine, Propuls. Power Res., 4(3) (2015) 123-131.
- [18] X. Chen, H. Wang, X. Wang, X. Liu, Y. Zhu, Fuel/air mixing characteristics of a Micromix burner for hydrogen-rich gas turbine, Energy, 282 (2023) 128786.
- [19] X. Chen, H. Wang, C. Wang, X. Wang, N. Wang, X. Liu, Numerical investigation into fuel-air mixing characteristics and cold flow field of single hydrogen-rich Micromix nozzle, Fuel., 332 (2023) 126181.

- [20] J. Choi, M. Ahn, S. Kwak, J.G. Lee, Y. Yoon, Flame structure and NOx emission characteristics in a single hydrogen combustor, Int. J. Hydrogen Energy., 47(68) (2022) 29542-29553.
- [21] H. Lei, B. Khandelwal, Investigation of novel configuration of hydrogen micromix combustor for low NOx emission, AIAA Scitech 2020 Forum., (2020), 1933.
- [22] P. Murthy, B. Khandelwal, V. Sethi, R. Singh, Hydrogen as a Fuel for Gas Turbine Engines with Novel Micromix Type Combustors, in 47th AIAA/ ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2011, 5806.
- [23] A. Karakurt, B. Khandelwal, V. Sethi, R. Singh, Study of Novel Micromix Combustors to be used in Gas Turbines; using Hydrogen, Hydrogen-Methane, Methane and Kerosene as a fuel, in 48th AIAA/ ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2012, 4265.
- [24] H. Lee, S. Hernandez, V. McDonell, E. Steinthorsson, A. Mansour, B. Hollon, Development of flashback resistant low-emission micro-mixing fuel injector for 100% hydrogen and syngas fuels, in Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 2009, 48838, 411-419.
- [25] A. Haj Ayed, Numerical Characterization and Development of the Dry Low NOx High Hydrogen Content Fuel Micromix Combustion for Gas Turbine Applications, 2017.
- [26] U. Bhayaraju, M. Hamza, S.M. Jeng, Development of Porous Injection Technology to Reduce Emissions for Dry Low NOx Combustors: Micromixer and Swirl Injectors, in Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 2017, vol. 50848: American Society of Mechanical Engineers, V04AT04A059.
- [27] A. Landry-Blais, S. Sivić, M. Picard, Micro-mixing combustion for highly recuperated gas turbines: effects of inlet temperature and fuel composition on combustion stability and NOx emissions, J. Eng. Gas Turbine Power., 144(9) (2022) 091014.
- [28] R.H. Chen, J.F. Driscoll, J. Kelly, M. Namazia, R. Schefer, A comparison of bluff-body and swirlstabilized flames, Combust. Sci. Technol., 71(4-6) (1990) 197-217.
- [29] N. Schmidt, M. Müller, P. Preuster, L. Zigan, P. Wasserscheid, S. Will, Development and characterization of a low-NOx partially premixed hydrogen burner using numerical simulation and flame

diagnostics, Int. J. Hydrogen Energy., 48(41) (2023) 15709-15721.

- [30] G. Bagheri, S.E. Hosseini, M.A. Wahid, Effects of bluff body shape on the flame stability in premixed micro-combustion of hydrogen-air mixture, Appl. Them. Eng., 67(1-2) (2014) 266-272.
- [31] A. Fan, J. Wan, K. Maruta, H. Yao, W. Liu, Interactions between heat transfer flow field and flame stabilization in a micro-combustor with a bluff body, Int. J. Heat Mass Transfer., 66 (2013) 72-79.
- [32] H.W. Funke, S. Börner, W. Krebs, E. Wolf, Experimental characterization of low NOx micromix prototype combustors for industrial gas turbine applications, in Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 54624(2011) 343-353.
- [33] Y. Yahagi, M. Sekiguti, K. Suzuki, Flow structure and flame stability in a micro can combustor with a baffle plate, Appl. Therm. Eng., 27(4) (2007) 788-794.
- [34] W.H. Kim, T.S. Park, Effects of noncircular air holes on reacting flow characteristics in a micro can combustor with a seven-hole baffle, Appl. Therm. Eng., 100 (2016) 378-391.
- [35] Turbomachinery International. Available online: https://www.turbomachinerymag.com/view/solvin g-the-challenge-of-lean-hydrogen-premix-combus tion-with-highly-reactive-fuels (accessed on 25 August 2023).
- [36] S. Hasemann, H. Seliger, P. Kutne, M. Aigner, Experimental and numerical design study for a small scale jet-stabilized micro gas turbine combustor, in Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 2018, vol. 51050: American Society of Mechanical Engineers, V04AT04A002.
- [37] X. Liu, W. Shao, Y. Tian, Y. Liu, B. Yu, Z. Zang, Y. Xiao, Investigation of H2/CH4-air flame characteristics of a micromix model burner at atmosphere pressure condition, in Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 2018, vol. 51067: American Society of Mechanical Engineers, V04BT04A015.
- [38] C. Xing, P. Qiu, L. Zhang, X. Yu, X. Chen, Y. Zhao, J. Peng, W. Shen, Research on combustion performance of a micro-mixing combustor for methanefueled gas turbine, J. Energy Inst., 103 (2022) 72-83.
- [39] Z. Liu, Y. Xiong, Z. Zhang, L. Ren, Y. Liu, Y. Lu, Investigation of a novel combustion stabilization mechanism and combustion characteristics of a

multi-nozzle array model combustor, Fuel., 327 (2022) 125-138.

- [40] Z. Liu, Y. Xiong, N. Yang, L. Ren, Y. Liu, S. Zhang, Z. Zhang, X. Xu, Comparison of combustion characteristics of MILD model combustor and multinozzle array model combustor fueled hydrogenmethane mixtures, Int. J. Hydrogen Energy., 48(81) (2023) 31802-31812.
- [41] T. Yusaf, A.S.F. Mahamude, K. Kadirgama, D. Ramasamy, K. Farhana, H.A. Dhahad, A. Talib, Sustainable hydrogen energy in aviation-A narrative review, Int. J. Hydrogen Energy., 52(C) (2023), 1026-1045.
- [42] H. W. Funke, J. Keinz, K. Kusterer, A. H. Ayed, M. Kazari, J. Kitajima, A. Horikawa, K. Okada, Experimental and numerical study on optimizing the DLN micromix hydrogen combustion principle for industrial gas turbine applications, in Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 2015, vol. 56680: American Society of Mechanical Engineers, V04 AT04A008.
- [43] H.W. Funke, J. Keinz, K. Kusterer, A.H. Ayed, M. Kazari, J. Kitajima, A. Horikawa, K. Okada, Experimental and numerical study on optimizing the dry low NOx micromix hydrogen combustion principle for industrial gas turbine applications, J. Therm. Sci. Eng. Appl., 9(2) (2017) 021001.
- [44] M.C. Lee, J. Yoon, S. Joo, J. Kim, J. Hwang, Y. Yoon, Investigation into the cause of high multi-mode combustion instability of H2/CO/CH4 syngas in a partially premixed gas turbine model combustor, Proc. Combust. Inst., 35(3) (2015) 3263-3271.
- [45] D.M. Wicksall, A.K. Agrawal, Acoustics measurements in a lean premixed combustor operated on hydrogen/hydrocarbon fuel mixtures, Int. J. Hydrogen Energy., 32(8) (2007) 1103-1112.
- [46] T. Lee, K.T. Kim, Combustion dynamics of lean fully-premixed hydrogen-air flames in a mesoscale multinozzle array, Combust. Flame., 218 (2020), 234-246.
- [47] Z. Cao, Y. Lyu, J. Peng, P. Qiu, L. Liu, C. Yang, Y. Yu, G. Chang, B. Yan, S. Sun, Experimental study of flame evolution, frequency and oscillation characteristics of steam diluted micro-mixing hydrogen flame, Fuel., 301 (2021) 121078.
- [48] J. McClure, D. Abbott, P. Agarwal, X. Sun, G. Babazzi, V. Sethi, P. Gauthier, Comparison of

hydrogen micromix flame transfer functions determined using RANS and LES, in Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 2019, vol. 58608: American Society of Mechanical Engineers, V003T03A009.

- [49] J. Beita, M. Talibi, S. Sadasivuni, R. Balachandran, Thermoacoustic instability considerations for high hydrogen combustion in lean premixed gas turbine combustors: a review. Hydrogen., 2(1) (2021) 33-57.
- [50] S. Dodo, T. Asai, H. Koizumi, H. Takahashi, S. Yoshida, H. Inoue, Combustion characteristics of a multiple-injection combustor for dry low-NOx combustion of hydrogen-rich fuels under medium pressure, in Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 54624 (2011) 467-476.
- [51] T. Asai, K. Miura, Y. Akiyama, M. Karishuku, K. Yunoki, S. Dodo, N. Horii, Development of fuelflexible gas turbine combustor, in Proceedings of the 45th Turbomachinery Symposium, 2016: Turbomachinery Laboratories, Texas A&M Engineering Experiment Station.
- [52] J. Melzak, T. Lieuwen, A. Mansour, High-bandwidth Modulation of H2/Syngas Fuel to Control Combustion Dynamics in Micro-Mixing Lean Premix Systems, Parker-Hannifin Corporation, 2012.
- [53] D. Cecere, E. Giacomazzi, A. Di Nardo, G.

Calchetti, Gas turbine combustion technologies for hydrogen blends, Energies., 16(19) (2023) 6829.

[54] N. Tekin, M. Ashikaga, A. Horikawa, H. Funke, Enhancement of fuel flexibility of industrial gas turbines by development of innovative hydrogen combustion systems, Gas Energy., 2 (2018) 1-6.

저자정보



김승민

인하대학교 항공우주공학과 박 사과정으로 관심 분야는 수소 가 스터빈 및 수소 연소 그리고 화 염구조이다.



이형진

인하대학교 항공우주공학과 부 교수로, 고속 비행제의 초음속 연소와 추진, 고체/액체 로켓, 가 스터빈, 수소 촉매 연소, 수소 자 발점화 현상에 대한 실험과 해석 연구를 진행하고 있다.