Copyright ⓒ 2026 KSAE
26SKSAE_A083

# PLIF를 이용한 수소 제트의 혼합기 분포 측정 및 성층 연소 특성 분석

기 영 민[1) ]· 김 정 호[1)] · 양 희 태[1)] · 황 준 식[1)] · 배 충 식[*1)]

한국과학기술원 기계공학과[1)]

# Measurement of Hydrogen Jet Mixture Distribution Using PLIF and Analysis of Stratified Combustion Characteristics

Youngmin Ki[1)] · Jungho Justin Kim[1)] · Heetae Yang[1)] · Joonsik Hwang[1)] · Choongsik Bae[*1)]

*Korea Advanced Institute of Science and Technology[1)]*

**Key words** : Hydrogen(수소), Planar laser-induced fluorescence(평면 레이저 유도 형광법), Stratified charge combustion(성층 연소), Combustion characteristics(연소 특성)

* 교신저자, E-mail: 배충식, csbae@kaist.ac.kr

탄소중립 사회로의 전환에 따라 수송 부문의 탈탄소화를 위한 대체 연료 기술이 요구되고 있다. 수소는 $CO_2$ 배출이 없고 넓은 가연 한계를 가져 희박 조건에서도 안정적인 연소가 가능하다. 그러나 포트 분사 기반 수소 엔진에서는 역화 및 조기착화와 같은 이상연소 문제가 발생할 수 있으며, 이를 해결하기 위한 방안으로 직접분사 기반 성층 연소가 주목받고 있다. 성층 연소는 점화부 근처에 반응성이 높은 혼합기를 형성하여 연소 안정성과 효율을 동시에 확보할 수 있으나, 그 성능은 점화 시점의 혼합기 분포, 특히 국부 당량비에 크게 의존한다.

본 연구에서는 혼합기 형성 시간에 따른 수소 제트 거동 및 정량적 혼합기 분포를 분석하고, 이를 연소 특성과 직접적으로 연계하여 평가하였다. 체적 1.39 L의 정적 연소 챔버를 이용하여 실험을 수행하였으며, 수소를 40 bar로 직접 분사하고 혼합기 형성 시간을 2000–4000 μs 범위에서 변화시켰다. 혼합기 분포는 acetone tracer 기반 PLIF 기법을 통해 계측하고, 3차원 재구성과 보정을 통해 정량적 당량비 분포를 도출하였다. 또한 schlieren imaging과 OH* chemiluminescence를 활용하여 화염 거동 및 반응 영역을 분석하고, 압력 데이터를 기반으로 점화 지연, 연소 기간 및 총 열방출량을 평가하였다. 실험 결과, 혼합기 형성 시간이 증가함에 따라 수소 제트는 확산되며 혼합기는 점차 균일하고 희박한 분포로 변화하였다. 짧은 혼합기 형성 시간에서는 점화 위치 근처에 국부적으로 농후한 영역이 형성되어 빠른 점화와 짧은 연소 기간, 높은 열방출량을 나타냈다. 반면, 혼합기 형성 시간이 증가할수록 국부 당량비가 감소하여 점화 지연이 증가하고 연소 속도가 감소하였다. 또한 OH* 발광 분석 결과, 강한 성층 구조에서는 높은 반응 강도와 지속적인 반응 영역이 나타난 반면, 희박하고 균일한 조건에서는 반응 강도가 감소하고 지속 시간이 짧아졌다.

본 연구를 통해 혼합기 형성 시간이 수소 성층 연소의 핵심 제어 인자임을 확인하였다. 짧은 혼합기 형성 시간은 강한 성층 구조를 형성하여 빠른 점화 및 높은 열방출 특성을 유도하는 반면, 과도한 혼합은 연소 성능을 저하시킨다. 따라서 수소 직접분사 엔진의 성능 향상을 위해서는 점화 시점의 국부 당량비를 포함한 혼합기 분포의 정밀 제어가 중요하다.

Acknowledgment: 본 연구는 2026년 산업통상부의 재원으로 “탄소중립 및 CO2 규제 대응 세계최고수준 Heavy Duty용 11L급 직분식 수소엔진 기술개발” (No. P0028449)의 지원으로 수행이 되었습니다.