

분위기 압력에 따른 성층 수소제트의 연소 특성

양 희 태¹⁾ · 기 영 민¹⁾ · 김 정 호¹⁾ · 황 준 식^{*1)} · 배 충 식^{*1)}

한국과학기술원 기계공학과¹⁾

Combustion Characteristics of Stratified Hydrogen Jets under Varying Ambient Pressure

Heetae Yang¹⁾ · Youngmin Ki¹⁾ · Justin Jungho Kim¹⁾ · Joonsik Hwang^{*1)} · Choongsik Bae^{*1)}

Korea Advanced Institute of Science and Technology¹⁾

Key words : Hydrogen(수소), Stratified Charge Combustion(성층연소), Ambient Pressure(분위기 압력), Equivalence Ratio(당량비), Laser Induced Breakdown Spectroscopy(레이저 유도 플라즈마 분광법)

배 충 식, E-mail: csbae@kaist.ac.kr

황 준 식, E-mail: jhwang@kaist.ac.kr

수소는 연소 과정에서 탄소를 배출하지 않는 대표적인 대체 연료로, 탄소중립 사회로의 전환을 위한 유망한 에너지 매체로 주목받고 있다. 또한 넓은 가연 범위와 빠른 화염 전파 특성으로 인해 희박 조건에서도 안정적인 연소가 가능하여 높은 열효율 달성에 유리하다. 그러나 낮은 점화 에너지와 짧은 소염 거리로 인해 역화 및 조기 점화와 같은 연소 안정성 문제가 발생할 수 있으며, 기체 연료 특성으로 인해 기존 포트 분사 방식에서는 체적 효율 저하로 인한 출력 감소가 발생할 수 있다. 이러한 한계를 극복하기 위한 방안으로 연료를 실린더 내부로 직접 분사하는 직접 분사(Direct Injection, DI) 방식이 주목받고 있다. 직접 분사 방식은 분사 시기와 위치를 제어함으로써 연소실 내 혼합기 분포를 능동적으로 조절할 수 있으며, 이를 통해 다양한 연소 전략을 구현할 수 있다. 이러한 DI 기반 연소 전략 중 하나인 성층연소(Stratified Charge Combustion, SCC)는 점화 위치 주변에 상대적으로 농후한 혼합기를 형성하고 그 외 영역에는 희박한 혼합기를 형성함으로써, 희박 조건에서도 안정적인 점화와 빠른 화염 전파를 가능하게 하여 수소 내연기관에 유망한 연소 전략으로 평가된다.

수소 SCC에서 연소 거동은 점화 위치 주변에서 형성되는 국부 당량비에 크게 영향을 받으며, 국부 당량비는 수소 제트의 혼합 거동에 의해 결정되는 핵심 변수이다. 그러나 기존 연구들은 주로 국부 당량비 자체의 변화에 따른 연소 특성에 초점을 맞추어 왔으며, 동일한 국부 당량비 조건에서 제트의 공간적 분포 구조가 연소 거동에 미치는 영향은 충분히 규명되지 않았다. 특히 주변 압력은 제트의 침투, 수축 및 공기 유입 과정에 영향을 미쳐 제트 구조를 변화시키는 동시에 국부 당량비 또한 변화시키기 때문에, 두 변수의 영향을 독립적으로 분리하여 해석하는 데 한계가 존재한다.

이에 본 연구에서는 국부 당량비의 영향을 배제한 상태에서 수소 제트 구조가 연소 특성에 미치는 영향을 규명하고자 하였다. 이를 위해 정적 연소실(Constant Volume Combustion Chamber, CVCC)을 이용하여 주변 압력(5, 10, 15 bar)을 변화시키며 수소를 직접 분사하고, 레이저 유도 파괴 분광법(Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS)을 이용하여 점화 위치에서의 국부 당량비를 정량적으로 계측하였다. 이후 각 주변 압력 조건에서 동일한 국부 당량비를 형성하는 혼합 형성 시간(Mixture Formation Time, MFT)을 도출함으로써, 동일한 국부 당량비를 가지면서도 서로 다른 제트 구조를 갖는 조건을 구성하였다.

연소 실험은 동일 조건에서 공기 분위기 하에 수행되었으며, 압력 기반 열방출률(AHRR) 분석과 고속 솔리덴 이미징을 통해 화염 전파 및 열방출 특성을 정량적·형상학적으로 분석하였다. 실험 결과, 동일한 국부 당량비 조건에서도 주변 압력에 따라 형성된 제트 구조의 차이가 연소 거동에 직접적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히 높은 주변 압력 조건에서는 글로벌 당량비 기준으로는 상대적으로 희박한 조건임에도 불구하고, 제트 수축에 의해 전체적인 혼합기가 더 높은 밀도로 집중되는 구조가 형성되었다. 이로 인해 화염 전파 속도가 증가하고 동일 시간 내 열방출률이 증가

하는 경향을 보였다. 이는 국부 당량비 자체의 증가가 아닌, 동일 당량비 조건에서의 혼합기 분포 및 질량 집중 효과에 의해 연소 반응 영역이 강화되었기 때문으로 해석된다. 반면, 낮은 주변 압력에서는 보다 확산된 제트 구조가 형성되어 동일한 국부 당량비 조건에서도 화염 전파가 상대적으로 완만하게 진행되는 특성이 나타났다.

본 연구는 수소의 연소과정에서 제트 구조의 영향을 분리하여 분석함으로써, 수소 SCC에서 혼합기의 공간적 분포 및 질량 집중이 연소 거동을 결정짓는 핵심 인자임을 규명하였다. 이는 향후 수소 직접 분사 엔진에서 혼합기 형성 및 연소 제어 전략 수립에 중요한 물리적 통찰을 제공한다.