

소형 파워트레인용 수소 직접 분사 엔진의 연소실 설계 및 운전 조건 최적화를 위한 수치해석적 연구

강 현 응¹⁾ · 주 강 민¹⁾ · 조 민 수²⁾ · 박 정 수^{*3)}

조선대학교 기계공학과 대학원¹⁾, 조선대학교 기계공학과²⁾, 조선대학교 기계공학과³⁾

CFD Analysis for Optimization of Combustion Chamber Design And Operating Conditions under Hydrogen Fueled Direct Injection Engines for Small Powertrains

Hyunung Kang¹⁾ · Kangmin Ju¹⁾ · Minsu Cho²⁾ · Jungsoo Park^{*3)}

Graduate School, Department of Mechanical Engineering Chosun University, Republic of Korea¹⁾,
Undergraduate School, Department of Mechanical Engineering Chosun University, Republic of Korea²⁾,
Department of Mechanical Engineering Chosun University, Republic of Korea³⁾

Key words : Air-Hydrogen Mixture (공기-수소 혼합), Alternative Fuels (대체 연료), Direct Injection (직접분사), Hydrogen (수소), Internal Combustion Engine (내연기관), Lean Burn (희박 연소)

* 교신저자, E-mail: j.park@chosun.ac.kr

전 세계적으로 탄소중립을 달성하기 위한 노력이 가속화되면서, 무탄소 연료로 수소가 주목받고 있다. 수소 엔진은 기존 내연기관 기술을 활용하면서도 CO₂ 배출이 없어 모빌리티 분야의 탄소 중립 솔루션으로 기대된다. 특히 수소 직분사 방식은 포트 분사 방식 대비 체적효율이 높고 백파이어 위험이 낮아 고출력 엔진 개발에 유리하다. 그러나 수소는 기존 화석 연료 대비 연소 속도가 빠르고 착화 에너지가 낮아, 연소실 형상 및 인젝터 배치 설계가 엔진 성능과 배출 특성에 큰 영향을 미친다. 따라서 수소 직분사 엔진의 최적 설계를 위해서는 연소실 내부의 혼합 및 연소 특성에 대한 상세한 분석이 필수적이다.

본 연구는 수소 직분사 엔진 개발을 위한 최적 연소실 설계 방안을 도출하는 것을 목적으로 한다. 소형 디젤 엔진을 베이스 엔진으로 선정하고, 이를 수소 직분사 엔진으로 전환하기 위한 연소실 설계 연구를 수행하였다. 두 가지 연소실 형상(실린더 헤드 및 피스톤 조합)에 대해 총 네 가지 케이스의 인젝터 위치에 대한 수치해석적 연구를 수행하였다. CONVERGE CFD 프로그램을 이용하여 흡기 및 압축 과정에서의 공기-수소 혼합 특성을 분석하였으며, 혼합 균일도 및 당량비 분포를 정량적으로 평가하였다. 이후 혼합 특성 분석 결과를 바탕으로 엔진 및 파워트레인 분석 전문 프로그램인 GT-SUITE를 연계하여 연소 특성, 열효율, 출력 성능 및 NO_x 배출 특성을 평가하였다. 해석 결과 연소실 형상과 인젝터 위치에 따라 공기-수소 혼합 특성이 크게 달라지는 것으로 나타났다. 4개의 인젝터 위치 케이스 중 스파크 플러그와 가까운 인젝터에서 연소실 내 혼합 균일도가 가장 우수하였으며, 2가지 연소실 형상 비교 결과, 형상에 따라 혼합 패턴 및 국부적 농후/희박 영역 형성에 차이가 확인되었다. 실린더 내 연소 특성 결과 혼합 특성이 우수한 케이스에서 보다 안정적인 연소 및 향상된 성능 경향을 확인하였다. 이를 통해 연소실 형상과 인젝터 위치가 공기-수소 혼합 특성에 큰 영향을 미치며, 이는 엔진 성능 및 배출 특성과 밀접한 관련이 있음을 확인하였다. 본 연구 결과는 수소 직분사 엔진 개발을 위한 최적 설계 방향을 제시한다.

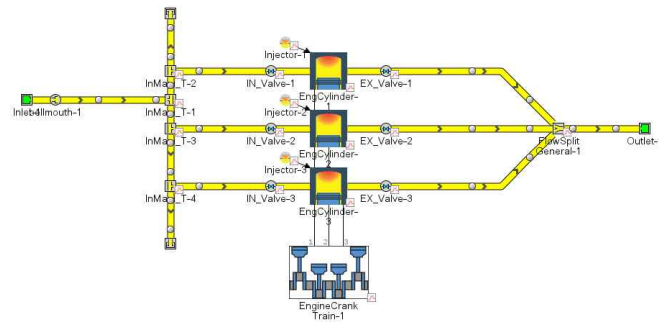


Figure. 1 Hydrogen DI engine model in GT-SUITE.

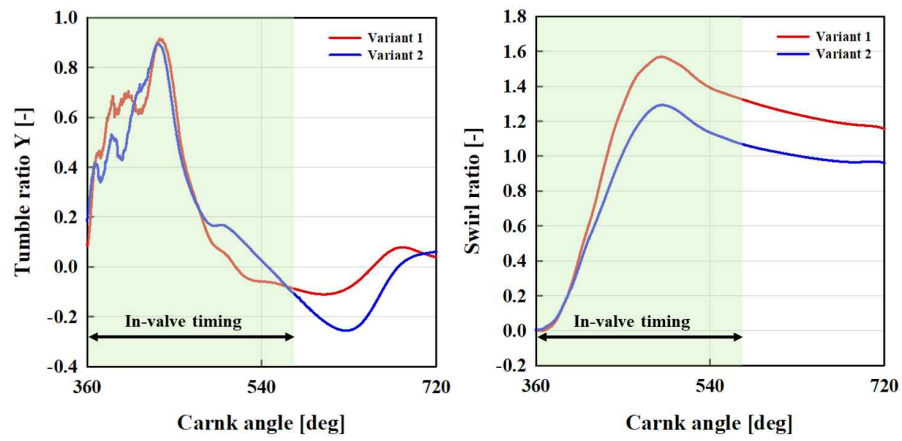


Figure. 2 Tumble and Swirl Characteristics by Chamber Geometry.

본 연구는 산업통상자원부 산하 한국산업기술기획평가원의 지원을 받아 수행되었음.(과제번호 RS-2025-15373033)