

발전용 소형 수소 PFI 엔진의 연소 및 성능 특성에 대한 수치해석적 연구

강 현 응¹⁾·주 강 민¹⁾·김 정 현¹⁾·박 정 수^{*2)}

조선대학교 기계공학과 대학원¹⁾·조선대학교 기계공학과¹⁾·조선대학교 기계공학과^{*2)}

A Numerical Study on the combustion and performance characteristics of a small hydrogen PFI engine for power generation

Hyunung Kang¹⁾ · Kangmin Ju¹⁾ · Jeonghyeon Kim¹⁾ · Jungsoo Park^{*2)}

Graduate School, Department of Mechanical Engineering Chosun University, Republic of Korea¹⁾,
Undergraduate School, Department of Mechanical Engineering Chosun University, Republic of Korea¹⁾,
Department of Mechanical Engineering Chosun University, Republic of University^{*2)}

Key words : Hydrogen Internal Combustion Engine (수소 내연기관), Port Fuel Injection (포트 분사), Range Extended Electric Vehicle (주행거리 연장용 전기차), Design of Experiments (실험 계획법), Latin Hypercube Sampling (라틴 하이퍼큐브 샘플링), Pareto Optimization (파레토 최적화)

교신저자, E-mail: j.park@chosun.ac.kr

내연기관은 한 세기 이상 모빌리티와 산업 동력원으로서 중요한 역할을 해왔다. 그러나 이와 함께 가솔린과 디젤과 같은 탄소 기반 탄화수소계 연료에 대한 의존도가 급격히 증가하면서, 지구 온난화를 가속화하는 결과를 초래하였다. 이러한 온난화 문제를 완화하기 위해 다운사이징, 연료 효율성 향상, 배기가스 저감과 같은 다양한 연구가 진행되어 왔으며, 최근에는 보다 친환경적이고 재생 가능한 대체 에너지원의 개발을 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

수소는 화석 연료를 대체할 수 있는 탄소 중립적인 에너지원으로 주목받고 있으며, 이를 내연기관에 적용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 수소는 탄소를 포함하지 않아 연소 시 이산화탄소(CO₂)를 배출하지 않으며, 낮은 점화에너지(약 0.02 mJ), 넓은 가연 한계, 높은 확산 계수 등의 특성을 바탕으로 희박 혼합 조건에서도 안정적이고 빠른 연소가 가능하다. 이러한 연소 특성은 연비 개선뿐만 아니라 질소산화물(NO_x), 입상물질(PM) 등의 배출가스 저감에도 기여할 수 있다, 선행연구에서는 직접 분사 가솔린 엔진에서 서로 다른 비율의 수소를 혼합하여 실험한 결과, 수소 함량이 증가할수록 연소 안정성과 속도가 향상되었으며, 특히 저부하 조건에서 PM 배출이 크게 감소하는 경향을 확인하였다. 따라서 수소 연료의 연소 메커니즘과 최적 운전 조건에 대한 체계적인 이해는 기존 내연기관 기술을 기반으로 한 친환경 동력 시스템 개발에 중요한 기초가 된다.

본 연구는 800cc 2기통 터보차저가 장착된 가솔린 포트 분사 스파크 점화 엔진을 기반으로 가솔린 대신 수소를 연료로 채택하여 엔진 시스템을 구축해 기초 연구를 진행하였다. 3000rpm 전부하 조건에서 Equivalence ratio, Boost pressure, Spark timing을 변수로 선정하여 각 변수의 경향성을 파악 후 연비 최적점과 성능 최적점을 제안하였다. 연구를 수행하기 위한 해석 도구로는 엔진 설계 및 성능 해석에 최적화된 1D 시뮬레이션 소프트웨어인 Gamma Technology의 GT-SUITE와 3D CFD 소프트웨어인 CONVERGE를 활용하여 해석을 진행하였다. 엔진에 대한 개략도는 그림 1에 제시되어 있다. 연비 최적점과 성능 최적점을 제안하기 위한 실험 방법으로 Latin Hypercube Sampling(LHS)을 활용한 실험 계획법(Design of Experiments, DoE)과 Pareto 최적화 기법을 적용하였다. LHS는 설계 변수 공간을 균등하게 동일한 확률구간으로 샘플링 하여 실험 효율을 극대화하는 기법이다. LHS에 대한 개략도는 그림 2에 제시되어 있다. Pareto 최적화 기법은 변수들이 트레이드 오프(Trade-off) 관계에 있을 때 단일 최적해가 아닌 최적의 선택지를 제공하여 요구 사항에 따라 다양한 해를 선택할 수 있다는 장점이 있다.

연구 결과 Spark timing을 진각 시킬수록 실린더 내 압력이 증가하는 경향성을 보였고, 이에 따라 혼합기의 온도도 압력이 상승하면서 화염 전파 속도가 증가하고 연소 속도가 단축되는 경향을 보였다. 이는 수소의 낮은 점화 에너지와 높은 연소 속도로 인해 연소 압력 상승률이 크게 증가했다는 것을 의미한다. 당량비의 경우(그림 3), 일정 수준까지 증가하면 NO_x 배출이 급격히 증가하다 다시 감소하는 경향성을 보였다. 이는 Zeldovich 메커니즘

에 의해 NO_x 형성이 연소 온도와 밀접하게 연관되어 있음을 보여준다. 부스트 압력을 증가시킬 경우 체적 효율이 향상되면서 흡기 혼합기의 밀도가 증가하고, 연소 중 혼합물의 에너지 밀도가 높아져 전체 연소 압력과 출력 성능이 향상되는 결과를 보였다.

이러한 변수들 간 상호작용을 통해 수소의 높은 연소 반응성과 짧은 지연 시간으로 인해 실린더 내 최대 제동 토크에 대한 점화시기(Maximum brake torque timing)를 명확히 도출할 수 있었으며, NO_x 및 BSFC를 통해 연비 및 배출 특성 간의 균형점을 제시할 수 있었다. 이를 통해, 수치해석적 접근을 통한 주행거리 연장용 수소 전소 엔진의 예측 가능성을 제시하였다. 특히, 본 연구에서는 Pareto 최적화 기법 통해 단일 목표가 아닌, 성능과 연비, 배출 특성 간의 다중 목표 균형 해를 확보하였다. 이를 통해 소형 PFI 수소 엔진의 주요 운전 변수에 따른 연소 특성을 정량적으로 분석하고, 기초연구 데이터를 확보하였다.

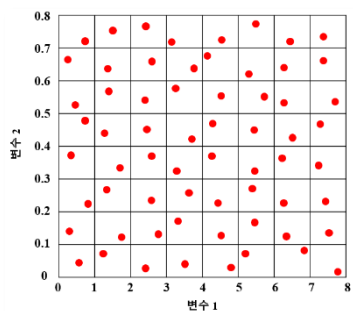
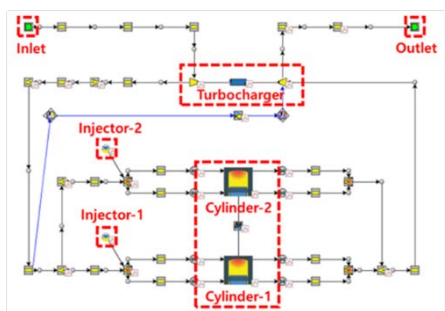


Fig. 1. 1D Model of the Hydrogen PFI Engine Fig. 2. Overview of Latin Hypercube Sampling

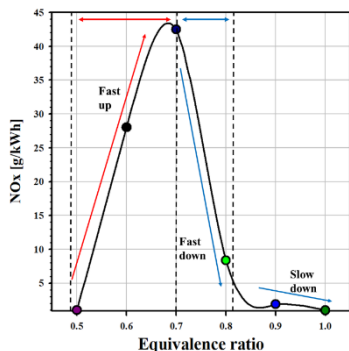


Fig. 3. Effect of Equivalence Ratio on NO_x Emissions

본 연구는 한국에너지기술연구원(KETEP)과 산업통상자원부(MOTIE)의 지원으로 수행되었음(No. RS-2024-00397362).