

발전용 소형 수소 PFI 엔진의 LP-EGR 적용에 따른 연소 및 성능 특성에 대한 수치 해석적 연구

강 현 응¹⁾ · 박 정 수^{*2)}

조선대학교 기계공학과¹⁾ · 조선대학교 기계공학과^{*2)}

A Numerical study on the LP-EGR of a small hydrogen PFI engine for power generation

Hyunung Kang¹⁾ · Jungsoo Park^{*2)}

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

Key words : Alternative Fuels (대체 연료), Hydrogen (수소), Internal Combustion Engine (내연기관), Low Pressure Exhaust Gas Recirculation (저압 배기가스 재순환 장치), Port Fuel Injection (포트 분사), Turbocharger (터보차저)

* 교신저자, E-mail: j.park@chosun.ac.kr

온실가스 배출 증가와 기후 변화 심화로 인해 탄소 기반 연료를 대체할 수 있는 청정 에너지원의 필요성이 크게 부각되고 있으며, 그중 수소는 이산화탄소 배출이 없는 차세대 연료로 주목받고 있다. 수소는 낮은 점화에너지와 넓은 가연 범위를 바탕으로 희박 연소 조건에서도 안정적 연소가 가능하다는 장점이 있어, 내연기관 적용 시 고효율·저배출 운전이 기대된다. 그러나 조기 점화와 백과이어 문제, 그리고 질소산화물(NOx) 배출은 상용화의 주요 걸림돌로 작용하고 있다. 이에 따라 배기가스 재순환(EGR) 기술은 NOx 저감 및 연소 특성 제어를 위한 핵심 전략으로 주목받고 있으나, 소형 수소 엔진에서의 적용 한계와 성능 손실 문제는 여전히 해결해야 할 과제로 남아있다.

본 연구는 800cc급 2기통 터보차저 가솔린 포트분사식 SI 엔진을 대상으로 수소 단일 연료 전환을 수행하고, 저압 배기가스 재순환(LP-EGR) 시스템 적용에 따른 성능 및 배출 특성을 분석하였다. 연구 방법으로는 GT-SUITE 기반 1차원 시뮬레이션과 CONVERGE CFD를 병행하여, 전부하 조건에서 2000 ~ 4000 rpm의 운전점을 선정하고, EGR 비율(0 ~ 50%)과 점화시기를 변수로 설정하였다. 또한, MBT 기준에서 최적 점화시기를 조정하여 EGR 적용 시의 연소 안정성 및 성능 변화를 평가하였다.

해석 결과, LP-EGR 적용은 전 구간에서 NOx 배출을 크게 저감하였으며, 특히 3000 rpm에서 EGR 율 25% 적용 시 약 90% 이상의 저감 효과를 확인하였다. 반면, 토크는 최대 26.4% 감소하여 성능과 배출 간의 뚜렷한 Trade-off 관계가 나타났다. 또한, 적절한 점화시기 보정을 통해 연소 불안정성을 억제할 수 있었으며, 특정 rpm 영역(2500 ~ 3000 rpm)에서는 BSFC 또한 개선 가능성이 확인되었다.

종합적으로, 본 연구는 LP-EGR 시스템이 수소 내연기관의 NOx 배출을 효과적으로 저감 하면서도 기존 가솔린 엔진 구조의 단순 개조를 통한 경제적 전환이 가능함을 입증하였다. 성능-배출 간 균형 점을 고려한 최적 제어 전략 수립을 통해, 수소 내연기관이 친환경 파워트레인으로서 상용화 가능성을 확보할 수 있음을 제시하였다. 향후 이상 연소 현상에 대한 추가 연구를 통해 수소 내연기관의 실용적 적용 범위를 더욱 확장할 수 있을 것으로 기대된다.

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

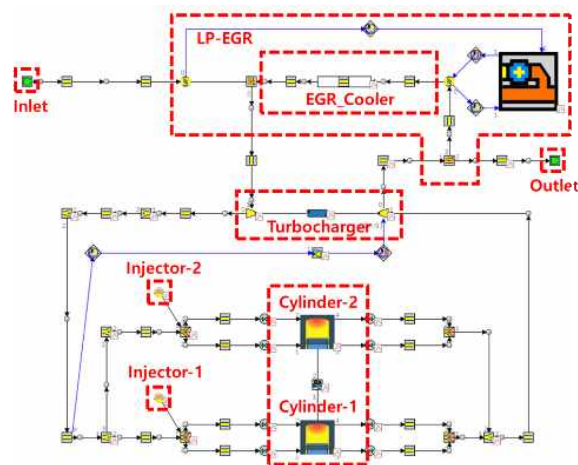


Figure. 1. LP-EGR hydrogen engine model in GT-SUITE.

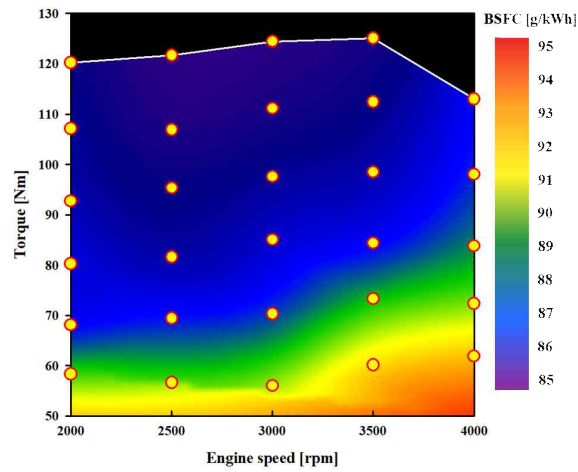


Figure. 2. Performance of the hydrogen engine under various operating conditions.

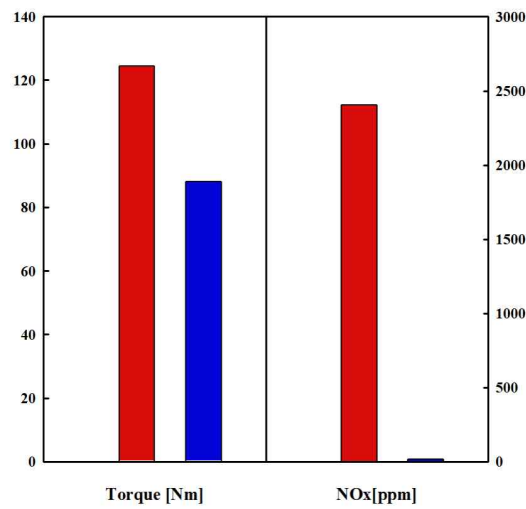


Figure. 3. Effect of EGR on torque and NOx emissions.