

수소 PFI 엔진의 제동 열효율 향상을 위한 가변 밸브 타이밍 및 LP-EGR

통합 최적화

한 승 현¹⁾, 김 준 석²⁾, 한 성 현²⁾, 배 정 태²⁾, 송 현 우¹⁾, 송 순 호^{*1)}연세대학교 기계공학과¹⁾, 한국건설기계연구원²⁾

Integrating Optimization of VVT and LP-EGR for Enhancing Brake Thermal Efficiency in Hydrogen PFI Engines

Seunghoon Han¹⁾ · Joonsuk Kim²⁾ · Sunghyun Han²⁾ · Jeongtae Bae²⁾ · Hyunwoo Song¹⁾ · Soonho Song^{*1)}Yonsei University¹⁾, Korea Construction Equipment Technology Institute²⁾**Key words** : 1D Engine Simulation(1차원 엔진 시뮬레이션), Exhaust Gas Recirculation(배기가스 재순환), Hydrogen Combustion(수소 연소), Lean Burn(희박 연소), Variable Valve Timing(가변 밸브 타이밍)

교신저자, E-mail: soonhosong@yonsei.ac.kr

최근 탄소 중립 실현을 위한 핵심 대안으로 H₂-ICE(수소 내연기관)이 주목받고 있으며, 특히 EREV(주행 거리 연장형 전기차)의 차세대 무탄소 모빌리티 구현을 위한 핵심적인 기술 대안으로 연구의 필요성이 강조되고 있다. 수소 연료는 가솔린 대비 빠른 화염 전파 속도로 인해 높은 열효율을 기대할 수 있으나, 고 부하 운전시 급격한 PRR(압력 상승률)과 H₂-Slip(수소 슬립) 현상이라는 기술적 제약이 존재한다. 본 연구에서는 800cc 터보 과급 수소 엔진을 대상으로 VVT(가변 밸브 타이밍)와 LP-EGR(저압 배기가스 재순환) 시스템의 조합을 통해 엔진 성능을 최적화하고 운전 가용 영역을 규명하고자 한다.

연구의 정확도를 높이기 위해 1D 엔진 시뮬레이션 툴인 GT-Suite과 MLP(다층 퍼셉트론) 기반의 머신러닝 모델링 기법을 결합하여 실제 엔진 다이내모미터 시험 데이터와의 오차를 약 1% 이하로 정밀하게 교정하였다. 해석 조건은 엔진 회전수 3200 RPM 조건에서 λ (공기과잉률)를 1.0에서 2.2까지 Sweep(스윕)하였으며, LP-EGR을 0~30%, IVO(흡기 열림 시기)와 밸브 오버랩 기간을 주요 제어 변수로 설정하였다. 특히 밸브 오버랩 시 발생하는 H₂-Slip을 억제하기 위해 EOI(연료 분사 시기) 최적화 로직을 모델에 반영하여 해석을 수행하였다.

해석 결과, $\lambda=1.0$ 에서 2.2로 희박해짐에 따라 BTE(제동 열효율)는 최대 5.1% 상승하였으며, 최적 BTE를 달성하는 IVO 지점은 λ 증가에 따라 진각되는 특성을 보였다. 초희박 영역인 $\lambda=2.2$ 조건에서는 EGR율 0% 및 IVO 329 CAD 조건에서 최상의 효율을 기록하였으며, EGR율을 10에서 30%로 증가함에 따라 연소 속도가 저하됨에 따라 BTE가 28.58%에서 23.38%까지 점진적으로 하락하는 경향을 확인하였다. 그러나 밸브 오버랩이 65 CAD를 초과할 경우, H₂-Slip이 반대로 급증하여 효율이 하락하는 Trade-off 메커니즘을 확인하였다. 이를 바탕으로 PRR 3.5 bar/deg 이하 및 H₂-Slip 1% 이내의 안전 기준을 적용한 3차원 운전 가용 영역을 구축하였다.

본 연구를 통해 도출된 통합 제어 전략은 수소 엔진의 물리적 제약 조건 내에서 고효율 운전 지점을 정밀하게 제시한다. 이는 향후 EREV 전용 수소 엔진의 실시간 ECU 제어 맵 설계 및 EMS(에너지 관리 전략) 최적화를 위한 핵심적인 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

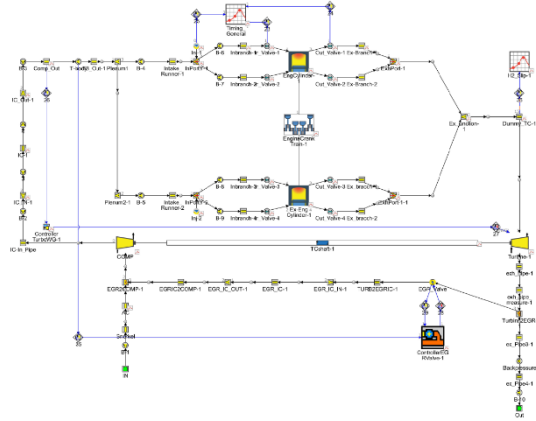


Figure. 1 GT-Power model of the target engine with LP-EGR

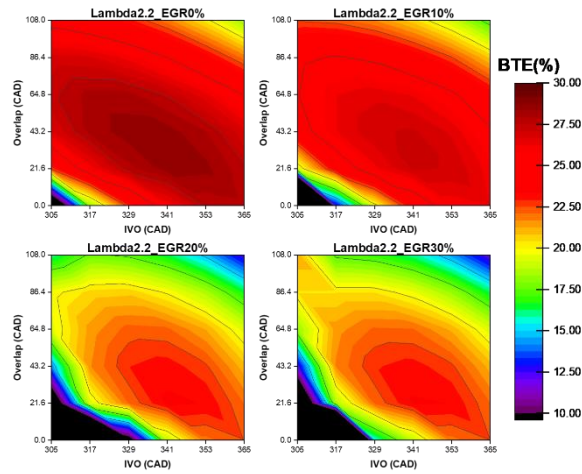


Figure. 2 BTE Contour Plots for various EGR rates at $\lambda=2.2$

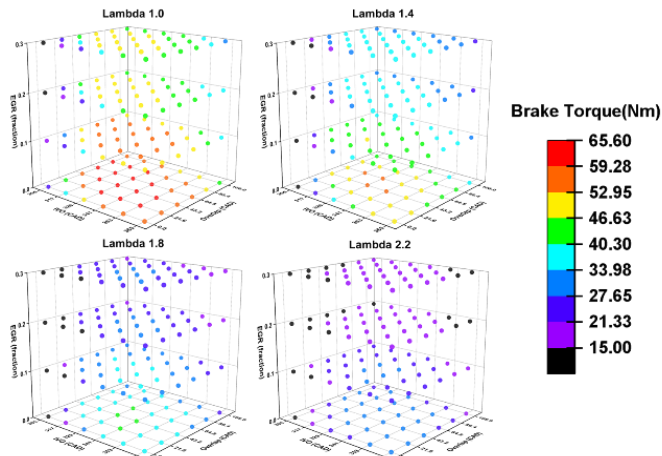


Figure. 3 3D Operating Envelope