Copyright ⓒ 2026 KSAE
26SKSAE_B013

린번 가솔린 하이브리드 차량용 pSCR-LNT-pSCR 통합 후처리 시스템의 글로벌 반응속도 모델링 및 체적 배분 최적화

서 성 민[1)]·문 세 인[2)]·김 홍 민[3)]·황 민 승[4)]·송 한 호[*5)]
서울대학교 기계공학부[1)2)3)4)5)]

Global Reaction Modeling and Volume Distribution Optimization of a pSCR-LNT-pSCR Integrated Aftertreatment System for Lean-Burn Gasoline Hybrid Vehicles

Seongmin Seo[1)] · Sein Moon[2)] · Hongmin Kim[3)] · Minseung Hwang[4)] · Han Ho Song[*5)]

Seoul National University[1)2)3)4)5)]

Key words : Lean-burn, Lean NOx Trap, passive SCR, Global kinetic model, Bayesian Optimization, Hybrid Electric Vehicle

교신저자, E-mail: hhsong@snu.ac.kr

하이브리드 차량에서 엔진 효율을 극대화하기 위한 희박 연소(lean-burn) 기술은 연비 개선에 유리하다. 하지만 공연비가 이론 공연비를 초과하는 희박 조건에서는 삼원촉매(TWC)의 NOx 환원 성능이 급격히 저하된다. 이에 따라 Euro 7 등 강화되는 배출가스 규제를 충족하기 위해서는 TWC 후단에 희박 조건 전용 NOx 저감 장치의 추가가 불가피하다. 최근 Lean NOx Trap (LNT)과 passive Selective Catalytic Reduction (pSCR)을 조합한 후처리 시스템이 제안되고 있으나, pSCR-LNT-pSCR 3단 직렬 구성에 대한 시스템 수준의 반응속도 모델은 아직 보고된 바 없으며, 각 촉매 간 체적 배분이 전체 NOx 전환 효율에 미치는 영향 또한 정량적으로 규명되지 않았다.

본 연구에서는 상기 pSCR-LNT-pSCR 통합 후처리 시스템의 글로벌 반응속도 모델을 개발하였다. 상류 pSCR은 TWC에서 생성된 NH_3 를 활용하여 NOx를 저감하고, LNT는 희박 조건에서 NOx를 저장한 후 리치 퍼지 시 환원하며, 하류 pSCR은 LNT에서 방출되는 잔류 NH_3 를 이용한 추가 NOx 저감을 담당한다. pSCR 촉매는 Cu-SSZ-13 기반 2-사이트 NH_3 저장 메커니즘(24개 반응)을, LNT 촉매는 3종 BaO NOx 저장·환원 및 PGM/CeO_2 산화·환원 메커니즘(42개 반응)을 채용하여 1차원 모노리스 반응기 모델에 통합하였다. 희박/농후 연소 조건 전환 시 촉매 표면 상태가 달라지는 점을 반영하기 위해 흡입 O_2 농도 6% 기준 시그모이드 함수 기반의 조건 의존형 파라미터 보간 기법을 도입하였으며, 총 84개의 전지수 인자 보정 파라미터를 Trust Region Bayesian Optimization(TuRBO-m) 알고리즘으로 동시 교정하였다. 8개 독립 신뢰 영역에서 약 45,700회의 평가를 수행하였으며, FTP-75 Phase 1-2 실측 데이터로 교정한 후 Phase 3-4 및 고속도로(HWFET) 사이클로 검증하여 모델의 일반화 성능을 확인하였다. 최종적으로, 교정된 모델을 활용하여 총 체적 제약 조건하에서 상류·하류 pSCR 체적 배분이 시스템 NOx 전환 효율에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고, 최적 설계 지침을 제시하고자 한다.