

Neural ODE 기반 하이브리드 모델을 활용한 복합 후처리 시스템의 light-off

과도 특성 예측

김 홍 민 · 서 성 민 · 송 한 호*¹⁾

서울대학교 기계공학부¹⁾

Light-off Transient Prediction of a Combined Aftertreatment System Using a Neural ODE-Based Hybrid Model

Hongmin Kim · Seongmin Seo · Hanho Song¹⁾

Seoul National University¹⁾

Key words : Neural ODE(뉴럴 ODE), light-off(촉매 활성화), pSCR-LNT(복합 후처리 시스템)

교신저자, E-mail: hhsong@snu.ac.kr

차세대 하이브리드 차량의 연료 효율을 높이기 위해 린번(Lean-burn) 운전 전략이 필수적이나, 희박 연소 시 발생하는 질소산화물(NOx)을 기존 Three-Way Catalyst(TWC)만으로 정화하는 데는 한계가 있다. 이를 해결하기 위해 passive Selective Catalytic Reduction(pSCR)과 Lean NOx Trap(LNT)을 직렬 배치한 pSCR-LNT-pSCR 복합 후처리 시스템이 추가로 도입되고 있으나, 전·후단 촉매 간의 복합적인 물질 및 열 전달 현상과 내부 반응 기작의 복잡성으로 인해 정밀한 모델링에 어려움이 따른다. 기존의 1차원 물리 기반 모델은 각 촉매를 분해하여 정상 상태(Steady-state)에서 파라미터를 최적화하는 과정에 많은 시간과 비용이 소모된다. 또한, 아레니우스(Arrhenius) 식의 수치적 특성으로 인해 냉시동 구간의 급격한 반응 속도 변화를 추종하는 데 제약이 존재한다. 이에 본 연구에서는 다수의 정상 상태 실험 데이터 대신, 실제 주행 사이클의 촉매 활성화 구간(light-off, 약 0~250초) 과도 데이터만을 활용하여 복합 후처리 시스템의 동특성을 효율적으로 모사하는 방법론을 제안한다.

본 연구의 목적은 Neural ODE 기반의 하이브리드 Universal Differential Equation(UDE) 모델을 구축하여, 촉매 Light-off 이전 과도 영역의 배출가스 농도 및 온도 응답을 예측하는 것이다. 제안된 모델은 물리적인 랭뮤어(Langmuir) 흡착 구조와 신경망 기반의 반응 속도 학습을 결합하고, 잔차 신경망(Residual NN)을 통해 촉매 간 상호 작용이나 확산 제한 등 해석적으로 표현하기 어려운 미지 효과를 보정하는 구조를 채택하여 물리적 인과율을 유지하면서도 모델의 범용성을 확보하였다. 특히 직접 측정이 어려운 촉매 내부의 NH₃ 흡착량(pSCR1, pSCR2)과 NOx 저장량(LNT)을 각각 독립적인 잠재 변수(Latent State)로 정의하고, 관측 가능한 배출가스 농도로부터 이를 역으로 추정함으로써 물리적으로 타당한 내부 상태 궤적을 도출하는 소프트 센서 기능을 구현하였다. 본 연구는 복잡한 복합 후처리 시스템의 제어 전략 최적화를 위한 대리 모델 구축 가이드라인을 제안하며, 향후 가상 센서 기술을 통한 배기 규제 대응력 향상에 기여할 것으로 기대된다.