

Sensor-Aware Loss를 이용한 하이브리드 차량용 희박 연소 엔진의 실시간

배출가스 예측 모델 연구

문 세 인·서 성 민·송 한 호^{*1)}

서울대학교 기계공학과^{*1)}

Real-Time Engine-Out Emission Prediction for Lean-Burn HEVs Using Sensor-Aware Loss with Trainable Time Constants

Sein Moon · Seongmin Seo · Hanho Song^{*1)}

Seoul National University^{*1)}

Key words : Hybrid Electric Vehicle (HEV), Lean-Burn Engine(희박연소엔진), Engine-Out Emissions(엔진 배출 가스), Sensor Lag(센서 지연), Time Constant(시정수), Real-Time Prediction(실시간 예측)

교신저자, E-mail: hhsong@snu.ac.kr

하이브리드 전기차량(HEV)에 적용되는 희박 연소(Lean-burn) 엔진은 우수한 열효율을 제공하지만, 연소 모드전환을 포함한 급격한 과도 운전 시 엔진 배출(Engine-Out, EO) 가스의 조성이 급격히 변화하며 이를 정확히 파악하는 것이 배출 가스 관리의 핵심이다. 물리 기반 모델은 화학반응의 상세 기술이 가능하나, 과도한 계산량으로 실시간 적용에 한계가 있으며 엔진 캘리브레이션 변경에 따른 모델 재최적화 부담이 크다. 이에 따라 차량 다이내모미터 시험 데이터로부터 EO 배출량을 직접 학습하는 데이터 기반 접근이 활발히 연구되고 있다. 데이터 기반 모델을 구축할 때, 배기가스 분석기의 1차 지연(First-order lag) 특성으로 인해 측정된 라벨(Label) 데이터가 실제 엔진 배기 시점의 배출 거동을 즉각적으로 반영하지 못하고 시간적으로 왜곡되는 문제가 발생한다. 기존의 역필터(Inverse filter) 방식은 별도의 시정수(τ) 측정 실험이 요구되며, 원시 데이터를 그대로 학습할 경우 모델이 왜곡된 시계열 패턴을 학습하게 되는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 센서의 응답 특성을 학습 과정에 통합한 Sensor-Aware Loss를 제안한다. 제안된 모델은 시간적 왜곡이 제거된 실제 배출 농도를 예측하되, 손실 함수 계산 시 예측값에 1차 지연 필터를 적용하여 원시 센서 측정값과 비교하도록 설계되었다. 이때 각 배출가스 화학종별 시정수를 학습 가능한 파라미터로 설정하여, 오차 역전과 과정에서 모델 가중치와 함께 최적화되도록 하였다. 이를 통해 별도의 시정수 측정 실험 없이도 센서의 동적 특성을 자동적으로 추정하며 왜곡이 보정된 예측값을 얻을 수 있다. 차량 속도 및 축매 상태를 포함한 5가지 주요 입력을 바탕으로 CO, NO, CO₂ 등 6종의 EO 배출량을 예측하는 모델을 구성하고, FTP-75 주행모드 데이터를 활용하여 학습 및 검증을 수행하였다. 본 연구의 제안 방법을 원시 센서 학습 및 역필터 전처리 방법과 비교하고, 학습된 시정수를 step-response 실험값과 대조하여 물리적 타당성을 검증하였다.