

다중 PEM 연료전지 스택을 갖춘 중장비 하이브리드 자동차의

심층 강화학습 기반 에너지 관리 전략

이 광 언^{*1)}·양 현 준¹⁾·성 동 환¹⁾·차 석 원^{**1)}

서울대학교 기계공학부¹⁾

Deep reinforcement learning based energy management strategy for heavy-duty hybrid vehicles with multiple PEM fuel cell stacks

Gwangeon Lee^{*1)} · Hyunjun Yang¹⁾ · Donghwan Sung¹⁾ · Suk Won Cha^{**1)}

Department of Mechanical Engineering, Seoul National University¹⁾

Key words : Deep Reinforcement Learning(심층강화학습), Energy Management Strategy(에너지 관리 전략), Proton Exchange Membrane Fuel Cell(양성자 교환막 연료전지), Hybrid Vehicle(하이브리드 차량), Optimization(최적화)

* 발표자: 이광언, E-mail: rhkdjs115@snu.ac.kr

** 교신저자: 차석원, E-mail: swcha@snu.ac.kr

최근 도로 운송 부문의 탈탄소화 요구에 따라, 양성자 교환막 연료전지(PEMFC)를 주 동력원으로 하는 하이브리드 자동차가 유력한 대안으로 주목받고 있다. 특히, 높은 출력과 내구성이 요구되는 중장비 차량의 특성을 고려하여, 단일 스택이 아닌 다중 PEMFC 스택을 탑재한 파워트레인 시스템은 효율성과 신뢰성 측면에서 큰 이점을 제공한다. 그러나 이러한 복잡한 다중 동력원 시스템의 잠재력을 극대화하기 위해서는 각 동력원의 에너지 흐름을 실시간으로 최적 제어하는 지능형 에너지 관리 전략(EMS)이 필수적이다. 기존의 규칙 기반 제어 방식은 다양한 실제 주행 환경에 능동적으로 대처하기 어렵고, 준최적의 성능에 머무르는 명백한 한계를 가진다.

본 연구에서는 다중 PEMFC 스택을 장착한 중장비 하이브리드 차량을 위해, 심층 강화학습(Deep Reinforcement Learning, DRL) 기반 에너지 관리 전략을 개발하고자 한다. 제안된 전략은 연속적인 상태 및 행동 공간을 효과적으로 처리하여, 시뮬레이션 환경과의 상호작용을 통해 수소 소비 최소화 및 시스템 내구성 향상이라는 다중 목표를 만족시키는 최적의 제어 정책을 스스로 학습한다. 이를 위해 중장비 차량의 동역학, 다중 PEMFC 시스템, 그리고 배터리를 포함하는 고충실도 시뮬레이션 모델을 구축하고, 강화학습 에이전트의 상태, 행동, 보상 함수를 정교하게 설계한다. 개발된 강화학습 기반 EMS 모델의 성능을 표준 주행 사이클 환경에서 정량적으로 평가하고, 이를 전통적인 규칙 기반 EMS와 비교 분석하여 제안된 방법론의 우수성을 입증한다. 결과적으로 연료 효율 개선과 핵심 부품의 수명 연장 효과를 확인함으로써, 차세대 친환경 상용차를 위한 인공지능 기반 제어 기술의 실효성과 산업적 가치를 제시하고자 한다.

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학ICT연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임(IITP-2025-RS-2024-00438007)