

ECMS와 심층강화학습 DDPG 알고리즘 기반 운용모드별 하이브리드 자동차의 최적 토크 분배 맵 개발

김 효 진¹⁾ · 박 기 웅¹⁾ · 조 한 신^{*1)}

한양대학교 미래자동차공학과 (미래자동차-SW융합전공)¹⁾

Development of an Optimal Torque Distribution Map for a Hybrid Electric Vehicles Based on Operating Modes Using ECMS and DDPG

Hyojin Kim¹⁾ · Kiwoong Park¹⁾ · Han-Shin Jo^{*1)}

Department of Automotive Engineering (Automotive-Computer Convergence), Hanyang University¹⁾

Key words : Parallel Hybrid Electric Vehicle(병렬형 하이브리드 자동차), Operating Mode(운용모드), Optimal Control(최적 제어), Torque Distribution(토크 분배), Equivalent Consumption Minimization Strategy(등가 소모 최소화 전략), Deep Deterministic Policy Gradient(심층 결정론적 정책 그라디언트)

* 교신저자, E-mail: hsj023@hanyang.ac.kr

병렬형 하이브리드 자동차(PHEV)는 내연기관과 전기 모터를 동력원으로 하여 연비 향상 및 배출 가스 저감에 기여한다는 점에서 핵심 기술로 주목받고 있으나, 두 동력원의 복잡한 상호작용을 실시간으로 최적 제어하는 것은 여전히 큰 기술적 과제로 남아있다. 또한 차량이나 전차와 같은 실시간 기동 시스템의 특성상 지연 판단 및 응답은 매우 치명적이므로, 수십 밀리초 단위의 빠른 연산과 예측 가능한 응답성을 보장해야 하는 엄격한 제약 조건도 가진다. 이러한 이유로, 최근 학계에서 활발히 연구되는 강화학습, 딥러닝, 최적 제어 이론을 적용한 차량 제어 전략은 높은 연산량과 응답 지연 가능성, 안전성 검증의 어려움으로 인해 실제 양산 차량에 적용되는 데 한계가 있다. 따라서 실제 현업에서는 제어기의 응답성과 안정성을 보장할 수 있는 규칙 기반(Rule-based) 및 맵 기반(Map-based) 제어가 여전히 핵심적인 제어 방식으로 사용되고 있다. 본 연구는 학술적 최적 제어 기법이 갖는 ‘최적성’을 현업의 맵 기반 제어 프레임워크에 효과적으로 통합하는 것을 목표로 하며, 이를 위해 오프라인 최적화를 통해 실시간 적용이 가능한 제어 맵을 생성하는 접근법을 제안한다.

이 접근법은 특히 내연기관과 전기 모터를 동력원으로 하는 하이브리드 자동차(HEV) 제어에 효과적이다. HEV 제어 전략 개발에는 목적에 따라 역방향 모델과 정방향 모델이 적용된다. 역방향 모델은 주행 사이클 전체 정보를 입력받아 이론적으로 최적 제어 알고리즘을 개발 및 적용하여 최적 연비를 도출하는 데 용이하지만, 차량 속도가 동적 상태변수가 아니므로 실제 차량의 동적 거동을 모사하기엔 한계가 있다. 반면, 정방향 모델은 실제 물리적인 시스템 해석 방법이므로 실제 차량과 유사한 동특성 모사가 가능하여 제어 로직 검증에 필수적이지만, 연산 부하가 커 실시간 최적 제어 알고리즘을 적용하기 어렵다. 따라서 본 연구는 역방향 모델링 환경에서 활용되는 최적 제어 알고리즘을 사용하여 오프라인에서 최적 제어 맵(Optimal Control Map)을 미리 생성하고, 이를 정방향 모델 제어기에 탑재함으로써 실시간성을 확보하면서도 연비를 최적화하는 것을 목표로 한다.

연구에 적용된 차량은 엔진과 모터가 병렬로 연결되고 그 사이에 엔진 클러치가 장착된 P2 타입 병렬형 하이브리드 시스템이며, 변속 시 단일 기어박스가 아닌 내연기관과 전기 모터 각각의 기어박스를 거쳐 동작하도록 구성한다. 이 구조는 차량 제어기(VCU)가 엔진 클러치의 체결 및 해제를 통해 전기 주행(EV) 모드와 하이브리드(Hybrid) 주행 모드를 능동적으로 선택할 수 있으므로 유연한 제어가 가능하다.

제안된 제어 전략은 상위 레벨의 규칙 기반 운용모드 결정과 하위 레벨의 최적 엔진-모터 토크 분배로 구성된다. 여기서, 상위 제어기는 차량 속도, 휠 토크, SoC와 같은 차량 상태 정보를 바탕으로

EV, Hybrid, Uphill, Engine의 4가지 운용모드 중 하나를 선택한다. 이러한 명확한 운용모드 구분은 주행 상황에 맞는 최적화된 제어를 가능하게 할 뿐만 아니라, 등판(Uphill)과 같은 특정 상황을 정의함으로써 일반 상용 차량, 특수 목적을 가진 군용 차량의 작전 모드(e.g. 저소음/저피탐 기동, 최대 출력 확보)와 같이 다양한 차종에 맞게 제어 전략을 수립하고 확장할 수 있는 기반이 된다. 본 연구에서는 SoC 임계값 이상일 때 저속 주행 시 항상 EV 모드로 작동하도록 하였고, 속도 증가 및 SoC 감소에 따라 엔진과 모터를 같이 사용하는 Hybrid 모드로 변환하도록 했다. 입력된 토크에 비해 차량 속도가 낮을 경우는 Uphill 모드로 작동하도록 하고, SoC가 매우 낮을 땐 엔진만으로 주행하는 Engine 모드로 변환하도록 하는 제어기를 제작하였다.

하위 제어기는 각 운용모드, 특히 연비에 가장 큰 영향을 미치는 하이브리드 모드에서의 최적 엔진-모터 토크 분배 및 최적 기어 변속 맵을 도출한다. 이를 위해 등가 소모 최소화 전략(ECMS)과 심층강화학습 알고리즘 중 하나인 DDPG를 활용한다. ECMS는 배터리 전력 소모량을 등가 연료 소모량으로 환산하여 총 소모량이 최소가 되는 해를 찾는 방식이며, DDPG는 제어기 자체를 에이전트로 모델링하여 학습을 통해 최적의 엔진 토크를 결정하는 정책을 수립하는 방식이다. DDPG의 state는 정규화된 차량 속도, 정규화된 휠 토크, 운용모드, SoC이며, action은 최적 엔진 토크, 그리고 reward는 연료 소모를 최소화하며 배터리 특성에 따른 최적 SoC 범위를 만족하도록 구성한다. 반면, 내연기관과 전기 모터를 함께 사용하는 또 다른 운용모드인 등판 모드는 저소음 및 엔진 성능을 고려하여 엔진은 엔진 최적 작동 라인(Optimal Operating Line)에서만 작동하도록 한다.

결론적으로, 본 연구는 ECMS와 DDPG라는 최적 제어 기법을 활용하여 병렬형 하이브리드 자동차의 운용모드별 최적 제어 맵을 도출하였다. Fig.1의 ECMS를 통해 얻은 최적 엔진 토크 맵과 Fig.2의 최적 엔진/모터 기어 변속 맵은 연비 효율을 최대화하는 제어 지표로서, 후속 연구에서 정방향 모델에 적용되어 성능 비교가 이루어질 것이다. 후속 연구에서 성능과 신뢰성, 안정성이 보장되는 결과를 얻게 된다면, 이 방법론은 학계에서 인정받는 이론과 현업의 실용적인 요구를 모두 만족시킬 수 있는 접근이 될 수 있다. 즉, 해당 연구를 통해 생성된 맵은 실제 차량 제어기나 정방향 시뮬레이터에 직접 적용될 수 있으며, 이는 연산량 과다 및 지연 문제로 어려워진 기존의 실시간 최적 제어를 대체할 실용적인 솔루션이 될 수 있음을 시사하며, 운용모드 기반의 설계는 특수 목적 차량으로의 기술 확장 가능성도 내포한다는 점에서 의의를 가진다.

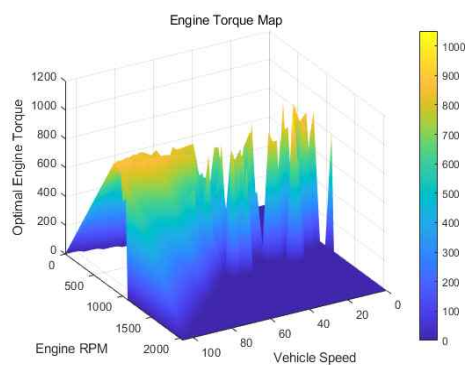


Fig. 1 Optimal Engine Torque Map by ECMS

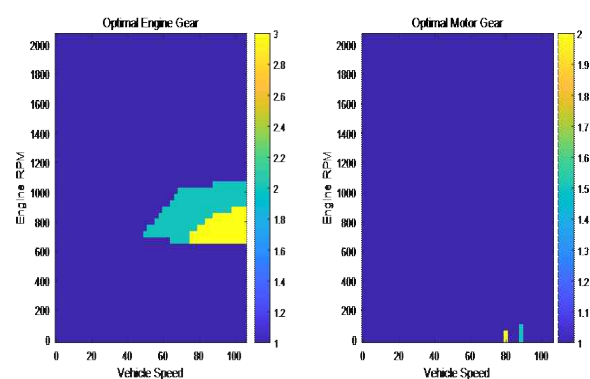


Fig. 2 Optimal Engine/Motor Gear Shifting Map by ECMS

Acknowledgement

이 논문은 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0020536, 2025년 산업혁신인재성장지원사업)