

최적 제어와 신경회로망을 이용한 하이브리드 전기자동차 시뮬레이션

김남욱¹⁾, 안국현¹⁾, 조성태²⁾, 임원식³⁾, 이장무¹⁾
서울대학교 기계항공공학부¹⁾, 현대 자동차²⁾, 산업대학교 자동차공학과³⁾

The Realization of Optimal Control Operation of a Hybrid Electric Vehicle using Neural Network and the Cruise HEV Simulator

Namwook Kim, Kukhyun Ahn, Sungtae Cho, Wonsik Lim, Jang Moo Lee

Key words : Hybrid Electric Vehicles (하이브리드 전기자동차), Optimal Control (최적 제어), Dynamic Programming (다이나믹 프로그래밍), Neural Network (신경회로망)

Abstract : The energy management of an HEV using optimal control and global optimization is thought to be closest to the best operation of the system. However, there are some controversies on the ways of defining the optimization problems and constituting the optimal control simulators. Here, we presented a simulator which adopts the concept of equivalent fuel economy and leads the vehicle to run in a more efficient way.

In order to realize the optimal operation of the HEV and check the validity of the control logics, we also developed a forward-facing simulator. The simulator was developed with the Cruise and MATLAB co-simulation interface. Especially, neural network controller was used for the hybrid control module in the simulator. With the simulator, the optimal operation could be converted into hybrid control rules and the validity of the operation was verified.

1. 서 론

하이브리드 차량은 두 개 이상의 동력원을 사용하기 때문에 각 동력원의 효율적인 사용을 위한 주행 전략이 필요하다. 즉, 동력원의 성능 특성을 고려하여 적절한 동력을 분배하면 보다 높은 효율로 차량을 운행할 수 있게 된다.

주행 전략을 개발하여 차량의 연비를 증대시키는 과정은 하이브리드 전기차량 관련 연구에서 매우 중요한 위치를 차지하며 매우 다양한 연구가 이루어져 왔다.

본 논문에는 엔진과 모터가 단일축으로 연결된 소프트 하이브리드 구조의 차량에 대해 FTP72 주행 사이클에서 이론 최대 연비를 계산하는 프로그램을 개발하였다. 이를 위해 전 주행 사이클에서 SOC 를 유지시키는 등가 연비 계수를 도입하였으며 등가 연비를 최소화하는 경로를 찾을 수 있도록 최적 제어 이론을 사용하였다.

최적 제어를 통한 연비 최적화를 위한 시뮬레이션은 후방향 시뮬레이션 기법으로 구성되어 주행 시의 부분 부하에 따라 필요한 동력만을 각각의 동력원이 출력하도록 맵핑된다. 이와 같은 운행이 차량의 실제 운행에서 가능하며 또한 예상

한 성능을 이끌어낼 수 있는지는 운전자 모델이 적용된 전방향 시뮬레이션을 통해 검증이 필요하다. 이를 위해 AVL 사의 상용 차량 성능 평가 프로그램인 Cruise 를 사용하여 차량을 모사하고 최적 제어를 통해 얻어진 차량 주행을 신경회로망을 도입하여 하이브리드 제어 법칙의 형태로 변환하는 과정을 개발하였다.

이러한 주행 전략의 개발은 신경 회로망 제어를 하이브리드 차량에 적용할 수 있는 제어 방법의 하나로 제시되었는데 향후에는 이러한 과정을 다양한 주행 사이클에 적용하고 그 결과를 고찰함으로써 제어 전략의 수립에 있어 외부 조건과 각 동력원 작동점의 연관성을 이끌어내고 주행 사이클에 덜 의존적인 주행 전략을 개발할 수 있을 것으로 생각된다.

2. 하이브리드 차량의 주행 최적화

최적의 주행 전략을 수립하려는 대상 하이브리드 차량의 구조는 Fig. 1 과 같다. 엔진과 모터가 일축으로 연결되고 클러치를 통해 CVT로 동력을 전달하는 Fig. 1 의 하이브리드 구조는 상대적으로 모터의 역할이 작고 엔진의 작동을 보조

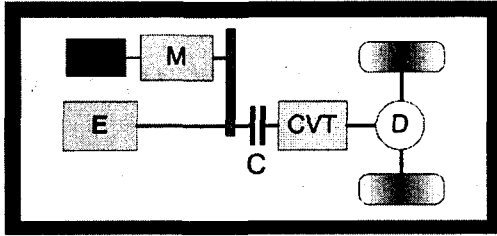


Fig. 1 Configuration of the HEV

해 주는 역할을 수행한다. Fig. 1의 구조를 가진 하이브리드 시스템을 대상으로 FTP72 사이클에서 최적의 연비 성능을 구현하기 위해 Bellman's principle of optimality 에 근거한 다이내믹 프로그래밍을 사용했다.

2.1 등가 연비의 도입

최적 제어 이론을 통해 하이브리드 전기차량의 연비를 최적화하기 위해서는 각 운행에 대한 비용을 평가하는 것이 필요하다. 이 때, 연료 소비량과 더불어 전기 에너지 소비량 혹은 배터리 SOC 에 대한 평가가 이루어져야 한다. 이러한 다목적 함수 최적화 문제를 해결하기 위해서는 SOC 를 운행 경로를 나타내는 상태 변수로 설정하거나 두 물리량을 단일화하여 단일목적함수 문제로 접근하는 방법이 있다.

두 물리량을 하나의 지수로 통합하는 등가 연비는 그 구성 방법이 명확히 정의되기 힘들며, 부분 부하마다 그 방법이 달라져야 하는 복잡한 개념이다. 그러나 본 연구에서는 FTP72 주행에 대해 최종 SOC 가 시작 SOC 와 가깝게 되는 적절한 등가 연비 계수를 통해 다음 식과 같은 1차 가중합을 등가 연비로 사용하였다. 또한 평형을 이루는 등가 연비 계수에 대해 미소 변이를 둔 추가의 시뮬레이션을 통해 SOC 가 유지된 상태의 연비를 내삽을 통해 추정할 수 있다.

$$J = \sum_{k=1}^n \{ F_{fuel\ consumption} + w \times (\Delta SOC) \}$$

2.2 다이내믹 프로그래밍

연구 대상 구조의 하이브리드 차량의 주행 상태를 나타내기 위해 두 개의 독립 변수를 설정할 수 있다. CVT 변속비와 엔진 토크를 독립 상태 변수로 잡으면 주어진 CVT 출력축의 부분 부하에 대해서 다음 식에 의해 나머지 동력원의 상태가 모두 결정된다.

$$\begin{aligned} T_{required} &= (T_{engine} + T_{motor}) \times \alpha \\ w_{required} &= w_{engine} \times \alpha \end{aligned}$$

(단, $\alpha = CVT \text{ ratio}$)

이에 따라 각 상황의 연료 소비량과 배터리

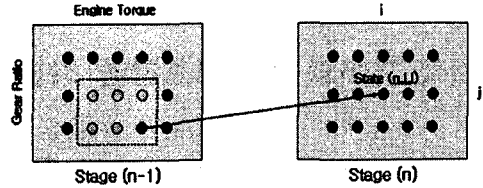


Fig. 2 Dynamic Programming

사용량이 정해지면 등가 연비가 평가되고 이를 최적 제어 이론을 통해 최적화하는 과정을 통해 목적 함수 값을 최소화하는 유일한 해가 얻어진다. 단, 엔진과 모터의 경우 각각 제한 조건들이 존재하게 되는데, Fig. 2 에서 특정 스텝의 작동점이 정해지면 그 전후 스텝의 작동점이 제한을 받게 되는 것을 보여주고 있다. 이는 동력 전달계의 과도 특성을 고려한 결과이다. 또한 엔진과 모터는 물리적인 최대 성능 이하로 제한되므로 이러한 제한 조건들을 설정하여 최적화를 수행하였다.

2.3 주행 최적화의 해석 결과

글로벌 최적화 결과를 다음 fig. 3을 통해 살펴보면 엔진의 작동이 최적 작동선을 중심으로 분포되어 있는 것을 확인할 수 있고 최적 제어를 통

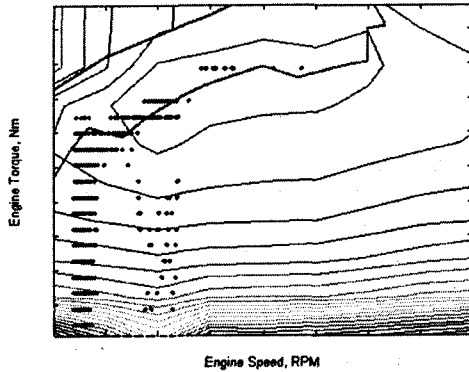


Fig. 3 Engine operating points

해 차량이 고효율 운전을 하고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 동력 분배비의 최적화 결과를 나타내고 있는데 동력 분배비는 다음의 값,

$$\text{Powersplit ratio} = \frac{\text{Engine Power}}{\text{Required Power}}$$

으로 결정되고 이 값이 1이 넘게 되면 엔진이 필요 이상의 동력을 내면서 모터의 충전을 수행한다. 이러한 상황은 SOC의 상태 유지 및 엔진의 최적 작동 주행을 위해 발생하게 된다. 소프트 하

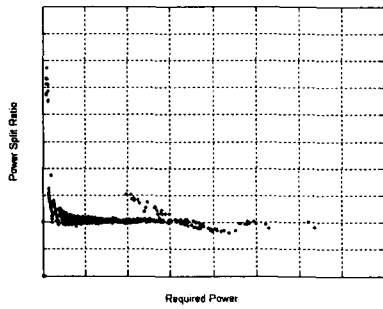


Fig.4 Powersplit ratio vs. required power

이브리드 시스템의 경우 엔진과 모터가 직결되어 엔진이 작동하지 않으면 부하로 작동하는 특성으로 인해 동력분배비가 '0'이 되는 ZEV 모드는 나타나지 않고 있다.

3. 최적 제어 주행 결과를 이용한 하이브리드 차량의 제어

FTP72 주행 사이클에서 얻은 최적의 데이터를 추종하는 제어기를 설계하기 위해 신경 회로망을 이용하였다. 이미 FTP72 주행 사이클에서 최적화된 주행 상태를 바탕으로 신경회로망을 구성하였으며 이를 바탕으로 전방향 시뮬레이터인 Cruise 차량 시뮬레이터에 연동하여 제어를 수행하였다.

이는 과도 특성이 존재하고 전방향의 제어를 수행하는 실제 차량에 최적 주행 결과를 적용하는 방법을 제시한 것이다.

3.1 Cruise 시뮬레이터를 이용한 차량 모델

Cruise 시뮬레이터는 차량의 성능을 시험할 수

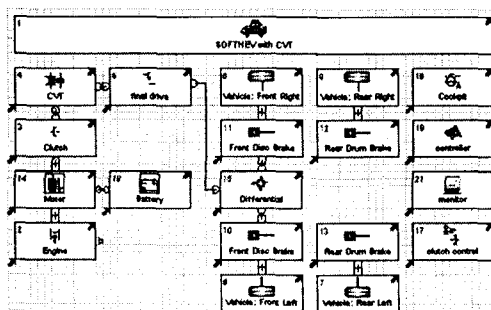


Fig. 5 Forward-facing HEV simulator (Cruise)

있는 상용 시뮬레이터로, 차량 동력 전달계의 과도 상태와 주행 부하 및 각 구성 요소의 다양한 물리적 특성을 구현하고 있다.

구성한 모델이 FTP72 사이클을 주행하면서 운전자 모델에서 페달 신호를 받아 제어기에 전달하면 제어기는 필요한 요구 토크가 요구 속도를 산출한다. 이를 바탕으로 제어기는 동력원의 제어 신호 및 각종 차량 제어 신호를 다시 차량의 각 구성 요소에 전달한다. 이를 구현하기 위해 모델 (Cruise simulator)과 제어기(Matlab Simulink)가 서로 연동하여 신호를 주고받는다.

3.2 신경 회로망 제어를 적용한 하이브리드 제어기 설계

주행 상태에 따라 동력 분배비가 달라지는 특

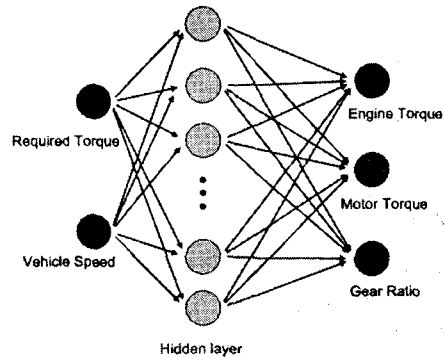


Fig. 6 Multi-layer perceptron (Neural network)

성은 여러 가지 요구 조건에 의해 비선형적인 성향을 나타낸다. 따라서 앞서 얻은 최적 결과를 제어에 반영하기 위해 신경 회로망 제어 기법을 사용하였다. 본 논문에서 사용한 기법은 다층 구조 인식자(Multi-Layer Perceptron)를 이용하였으며 이는 간단히 다음 Fig. 6 으로 표현된다.

신경 회로망의 최적 뉴런 구조를 위해 앞서 다이나믹 프로그래밍을 통해 얻어진 결과를 훈련 데이터로 사용하였으며 일정한 오차 범위 안에서 결과를 낼 수 있도록 은닉층을 증가시키면서 반복 학습을 수행하였다.

Fig. 6의 신경 회로망 제어기가 HCU(Hybrid Control Unit)의 핵심적인 역할을 담당하여 엔진 토크, 모터 토크, 기어비 신호를 출력하고 있으며 이 밖에도 차량의 제동 신호와 엔진의 출발 신호 및 모터의 작동 신호등을 HCU에서 제어한다.

모든 제어 신호는 제어기(Matlab simulink)에서 출력되면 이는 Cruise 와 Simulink의 상호 연동을 통한 동시 해석을 통해 이루어진다.

3.3 최적 주행 결과

Cruise 시뮬레이터를 이용한 차량의 연비 성능 해석 결과는 Table 1 과 같다.

Table. 1

	최적제어	Cruise with NN
연비(km/l)	19.37	18.97

위의 Table 1 에서 최적 제어를 통한 이론 최대 연비와 전방향 시뮬레이션으로 부터의 결과가 2% 정도의 오차를 보인다. 다음 Fig. 7 을 보면 특정 시간에서 최적 제어 시뮬레이터의 최적 엔진

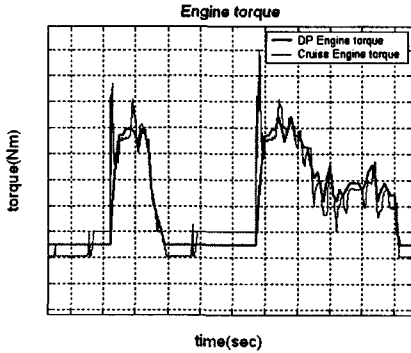


Fig. 7 Engine torque (optimal control vs. Cruise simulation)

토크 곡선과 전방향 시뮬레이션의 엔진 토크 곡선을 비교하고 있다. 후자의 경우 운전자의 페달 신호에만 의존해서 차량을 제어하고 있다는 점을 고려하면 신경 회로망 제어를 통해 최적 제어로 얻어진 주행을 잘 모사하고 있다고 할 수 있다.

추가적으로 다음 Fig. 8은 회생 제동이 SOC에 미치는 영향을 간단히 살펴 본 그래프이다. 위의 해석 결과를 고찰하면 모터 용량을 변화시키면서

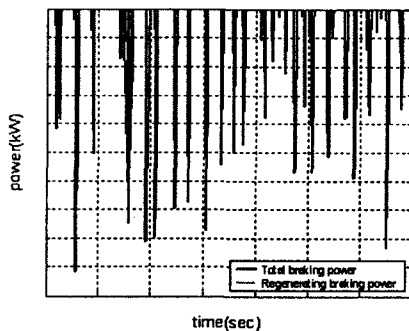


Fig. 8 Regenerative braking power absorption

회생 제동량의 변화를 관찰할 수 있는데 이 모델에 적용한 차량의 경우 차량이 FTP72 주행 사이클에서 브레이킹에 필요한 에너지의 45% 를 회생 에너지로 흡수하고 있는 결과가 도출되었다. 이는 엔진 주행 중 모터가 잉여분의 에너지를 흡수하는 것을 제외한 순수한 회생 제동의 흡수량이며 이 값은 배터리의 SOC의 평균 작동점 부근에서 약 30%에 달하는 양이다. FTP72의 주행 시간이

20 여 분 정도임을 감안하면 뛰어난 회생 제동 알고리즘을 씌우므로 SOC 유지 전략을 획기적으로 개선할 수 있을 것이다.

4. 결론

1) 등가 연비를 도입하여 최적 제어를 통해 하이브리드 전기차량의 최적 주행을 결정하고 연비를 평가하는 프로그램을 개발하였다.

2) 최적의 주행 결과를 바탕으로 얻어진 결과를 반복 학습하여 신경회로망 제어에 적용하였다. 이를 Cruise 시뮬레이터에 적용하여 그 결과가 타당하며 신경 회로망을 통해 하이브리드 제어를 설계할 수 있는 가능성을 보여주었다.

3) 하이브리드 시스템의 주행 전략은 주행 싸이클에 따라 다른 요구 동작 조건으로 인해 매우 다양하게 나타날 수 있다. 이러한 비선형성으로 인해 각 동력원의 용량 및 성능 곡선도 다양하게 나타날 수 있다. 신경 회로망이나 퍼지 제어와 같은 지능 제어를 이용함으로써 다양한 주행 싸이클에 덜 의존적이면서 최적의 성능을 내는 주행 전략을 수행하는 제어를 설계하고 향후 실제 차량에도 적용할 수 있을 것으로 생각된다.

References

- [1] Donal E. Kirk, Optimal Control Theory. Prentice Hall.
- [2] 조성태, 2002, “단일 성능 지수를 사용한 병렬형 하이브리드 차량의 연비 성능 최적화”, 서울대학교 기계항공공학부
- [3] 전순일, 2003, “주행패턴 예측을 기반으로 하는 하이브리드 차량의 적응형 다중모드 제어 전략”, 서울대학교 기계항공공학부