

P1-P2 병렬형 하이브리드 시스템의 토크 분배 제어 방법에 대한 연구

김한솔¹⁾ · 박성천²⁾ · 임원식^{*3)}

서울과학기술대학교 자동차공학과¹⁾ · 서울대학교 스마트자동차과²⁾ · 서울과학기술대학교 기계자동차공학과³⁾

Study on the Torque Distribution Control Method of P1-P2 Parallel Hybrid System

Hansol Kim¹⁾ · Sung-cheon Park²⁾ · Wonsik Lim^{*3)}

¹⁾Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Korea

²⁾Department of Smart Automobiles, Seoul University, Seoul 02192, Korea

³⁾Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Korea

(Received 14 November 2023 / Revised 3 January 2024 / Accepted 18 January 2024)

Abstract : In this paper, the control logic of a parallel hybrid system with a P1-P2 motor was studied. In determining engine on/off timing, the engine and motor torque distribution, the P1-P2 motor torque distribution, and the SOC management control are necessary in controlling the P1-P2 hybrid system. Backward simulation methods were then used in developing such a hybrid system control logic. Since the backward simulation method derives theoretical optimal operating points, it presents a real-time control logic configuration method that follows the backward simulation results. A rule-based control logic was constructed, and a control map was generated based on the results of the backward simulation. Next, a forward simulator was constructed to verify the control logic. Based on the fuel efficiency analysis, it was confirmed that the length of the backward simulation showed an error of within 8.18 %, compared to the previous one. It is verified that the SOC path is similar, and that the SOC management control logic converges to the intermediate SOC level, even when the analysis starts under SOC over-discharge and overcharge conditions.

Key words : Hybrid electric vehicle(하이브리드자동차), Control logic(제어 로직), Forward simulation(전방향 시뮬레이션), Torque distribution(토크 분배), SOC management control(SOC 관리 제어)

Nomenclature

T	: torque, Nm
ω	: rotational speed, rad/s
V	: vehicle speed, m/s
F	: force, N
P	: power, W
R_t	: tire dynamic radius, m
η	: efficiency
r	: gear ratio
I	: rotational inertia, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$
m_{fuel}	: fuel consumption, g

1. 서론

최근 환경문제 등으로 인하여 친환경 자동차의 중요성이 증가하고 있으며, 하이브리드 및 전기자동차의 점유율 또한 증가하고 있다.^{1,2)}

대부분의 하이브리드 시스템은 병렬형 하이브리드 시스템이 주로 적용되고 있으며, 도요타 차량은 유성기어 기반의 동력분기형 하이브리드 시스템을 적용하고 있다. 병렬형 하이브리드 차량은 기존 엔진구동 차량에서 변속기부터 휠까지의 시스템은 유지하고, 엔진과 변속기 사이에 모터를 적용한 구조이다. 이렇게 적용된 모터를 보통 P2 모터라고 정의하며, P2 모터와 엔진 사이에는 K0 클러치를 적용하여 엔진을 분리하고 EV구동이 가능하게 한다. 엔진 시동을 위한 모터가 추가로 적용되는데

*Corresponding author, E-mail: limws@seoultech.ac.kr

[†]This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

모터의 적용 위치에 따라 P0 또는 P1 모터로 정의된다. P1모터는 엔진과 K0클러치 사이에 엔진 크랭크축과 직결로 연결된 모터를 의미한다.³⁾

본 논문에서는 P1-P2 모터가 적용된 병렬형 하이브리드 시스템의 제어로직에 대하여 연구하였다. P1-P2하이브리드 시스템의 제어를 위해서는 엔진 On/Off 시점 결정, 엔진과 모터의 토크분배, P1-P2 모터의 토크분배, SOC 관리 제어가 필요하다. 하이브리드 시스템 제어를 위해 대표적으로 규칙기반 제어 또는 ECMS와 같은 실시간 최적화 제어 방법이 사용된다.⁴⁾ 기존의 결정론적 규칙기반 방법은 최적화 제어 방법에 비해 연산부하가 적지만, 연비 최적점에서 작동하기 어려운 단점이 있다.^{4,5)} 이러한 문제를 해결하기 위해, 본 논문에서는 동적 계획법 기반의 백워드 시뮬레이션 방법을 이용하였다. 동적계획법은 이론적인 전역 최적해를 도출하므로,^{6,7)} 동적계획법 결과를 추종할 수 있는 제어로직을 구축하면 연비성능을 향상시킬 수 있다. 따라서, 백워드 시뮬레이션 결과를 활용하여 제어맵을 생성하고 실시간 제어를 위한 규칙 기반의 제어로직을 구성하였다.

2. 하이브리드 시스템 모델링

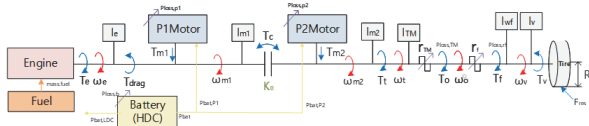


Fig. 1 Hybrid Powertrain system structure Modeling

연구대상 차량 시스템은 Fig. 1과 같이 P1-P2 하이브리드 시스템이 적용되어 있다. 엔진 출력축에 P1모터가 직결되어있는 시스템이며, K0클러치에 의해 엔진(P1 모터)과 변속기 입력축(P2 모터)이 결합 및 분리되 된다. K0클러치 분리를 통해 EV드라이브 모드가 구현된다.

$$\begin{bmatrix} I_e + I_{m1} & 0 \\ 0 & I_{m2} + I_{tm} + \frac{I_{wf} + I_v}{t_{tm}^2 r_f^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\omega}_e \\ \dot{\omega}_{m1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$= \begin{bmatrix} T_e + T_{m1} - T_{drag} - T_c \\ T_c + T_{m2} - \frac{T_v}{\eta_{tm} r_{tm} \eta_f r_f} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & -10 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -t_{tm} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -r_f \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - 1/R_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_e \\ \omega_{m1} \\ \omega_{m2} \\ \omega_t \\ \omega_o \\ \omega_v \\ V_{veh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$P_{bat} = P_{m1} + P_{m2} \quad (3)$$

$$P_m = f_{\eta_m}(w_m, T_m) w_m T_m (T_m < 1) + \frac{1}{f_{\eta_m}(w_m, T_m)} w_m T_m (T_m \geq 1) \quad (4)$$

$$\dot{m}_{fuel} = f_{fuel}(w_e, T_e) \quad (5)$$

Fig. 1의 동력전달 시스템의 동역학 방정식을 정리하면 식 (1)과 같으며, 속도 구속 관계식은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 배터리 소모과워 및 연료소비율은 식 (3)~식 (5)와 같다. 모터 효율은 효율맵 f_{η_m} 을 통해 도출되며, 연료소비율(\dot{m}_{fuel})은 연료 소비율맵(f_{fuel})을 통해 도출할 수 있다.

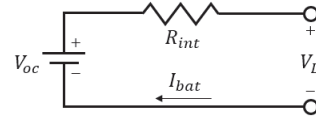


Fig. 2 Battery circuit model

$$V_L = V_{oc} - R_{int} I_{bat} \quad (6)$$

$$P_{bat} = V_L I_{bat} = V_{oc} I_{bat} - R_{int} (I_{bat})^2 \quad (7)$$

$$SOC = SOC_{in} - \frac{1}{Q_{bat}} \int_0^{t_f} I_{bat}(t) dt \quad (8)$$

배터리모델은 Fig. 2와 같이 잘 알려져있는 내부저항 모델을 적용하였다. 배터리 SOC는 식 (6)~식 (8)과 같이 소모전류 I_{bat} 을 통해 계산할 수 있다. Q_{bat} 은 배터리 용량을 의미하며, SOC_{init} 은 초기 SOC값을 의미한다.

3. P1-P2 하이브리드 시스템 제어 방법

P1-P2 하이브리드 시스템 제어를 위해서는 제어모드 결정, 엔진-모터 토크분배, P1-P2모터 토크분배, 배터리 SOC관리의 4가지 로직의 개발이 필요하다. 하이브리드 시스템 토크제어 방법으로는 규칙 기반의 제어, ECMS 제어 등 다양한 제어 로직이 선행연구 되었다. 본 논문에서는 제어기의 연산 부하가 가장 적은 규칙기반(Map base)제어로직 개발 방법에 대하여 다루었다. 제어맵 생성을 위해 백워드 시뮬레이션 방법을 이용하였다. 백워드 시뮬레이션은 동적 계획법을 기반으로 전역 최적해가 도출되기 때문에 이론적인 연비 최적화 작동점을

도출되며, 시뮬레이션 결과는 Fig. 3 및 Fig. 4와 같다. 동적계획법 알고리즘은 식 (9)와 같이 표현되며, 백워드 시뮬레이션 결과를 활용하여 실시간 제어에 적용할 수 있는 맵을 도출하는 방법에 대하여 정리하였다.

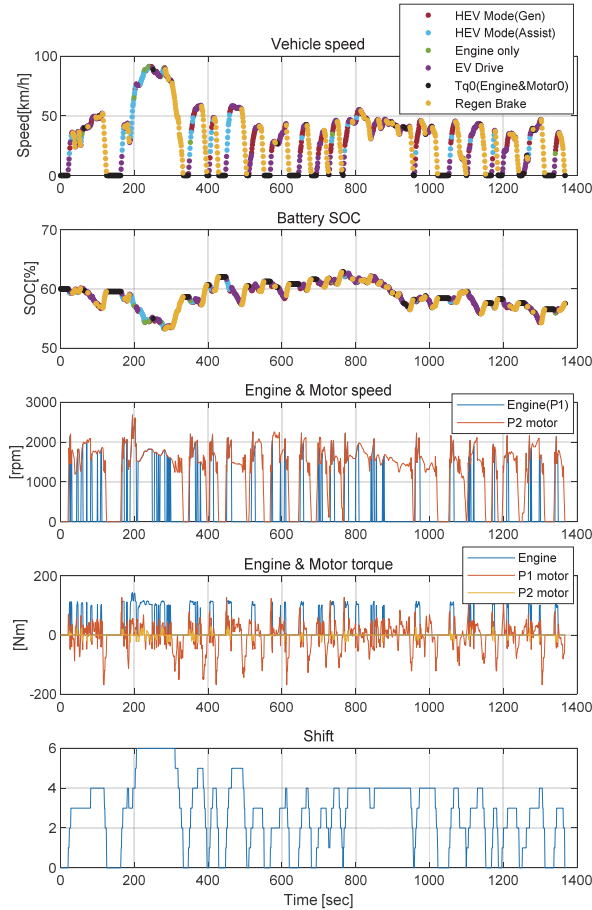


Fig. 3 Backward simulation results

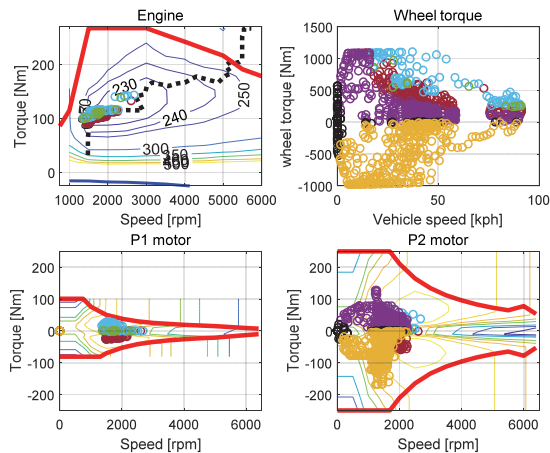


Fig. 4 Operating points of backward simulation

$$J_{i,N}^*(x(i)) = \min_{u(i)} [L(x(i), u(x(i))) + J_{i+1,N}^*(x(i+1))] \quad (9)$$

$\left(\begin{array}{l} i : \text{step}, N : \text{final step}, x : \text{state (SOC)}, L : \text{cost}, \\ J : \text{mi} \ni \mu \text{m cost}, u : \text{control variables (battery power)} \end{array} \right)$

3.1 백워드 시뮬레이션을 통한 HEV 제어모드 결정

Fig. 3의 백워드 시뮬레이션 결과를 보면 각 시점의 하이브리드 제어모드를 확인할 수 있다. 엔진이 분리되고 P2모터만으로 주행하는 EV 구동모드 및 엔진이 작동하는 하이브리드 제어모드를 확인할 수 있으며, Fig. 4를 보면 차속 및 필요구토크에 따라 하이브리드 작동모드가 구분되는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 엔진을 On/Off 하는 최적시점을 결정할 수 있다. 하이브리드 작동모드를 변속기 출력축 속도와 파워에 대하여 나타내면 Fig. 5와 같다. 출력을 기준으로 EV모드와 하이브리드로직이 구분되는 것을 확인할 수 있다. EV모드에서 하이브리드 모드로 전환되는 기준을 그림의 실선, 하이브리드 모드에서 EV모드로 전환되는 기준을 점선과 같이 정의할 수 있다. 이 두 개의 선을 맵으로 도출하면 모드전환 히스테리시스를 고려한 제어맵을 생성할 수 있다.

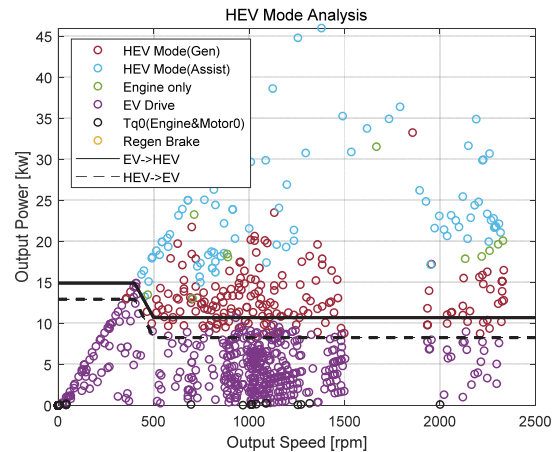


Fig. 5 Analyzing backward results of hybrid mode

3.2 백워드 시뮬레이션을 통한 엔진-모터 토크분배

백워드 시뮬레이션 작동점 중 K0 클러치가 결합된 상태에서 ‘엔진 속도’와 ‘변속기 입력축 기준 요구 토크’에 따른 ‘모터 합산 토크(P1 + P2)’를 도시하면 Fig. 6과 같다. 이를 곡면형태로 보간하여 나타내면 Fig. 7과 같이 나타나며, 2-D look-up 테이블 형태의 맵을 도출할 수 있다.

Fig. 7의 맵을 $f_{T_{m12}}$ 로 정의하면 식 (10)과 같이 하이브리드 모드에서의 엔진 요구토크(T_e^*)를 구할 수 있다.

$$T_e^* = T_t^* + T_{drag} - f_{T_{m12}}(T_t^*, \omega_t) \quad (10)$$

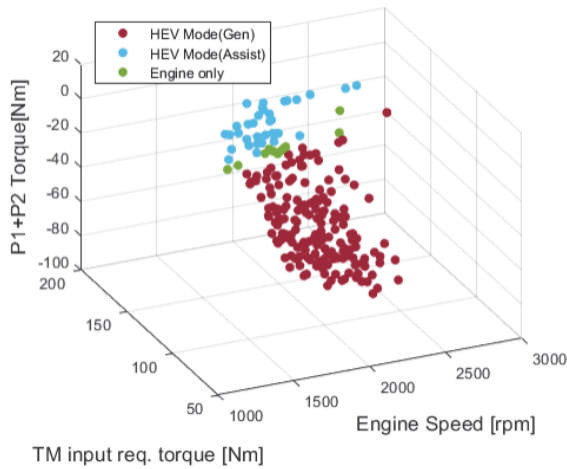


Fig. 6 Analyzing backward results of motor torque

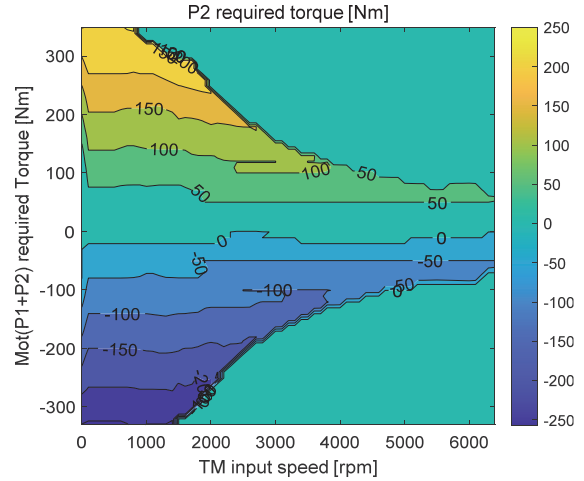


Fig. 8 P2 motor optimization map

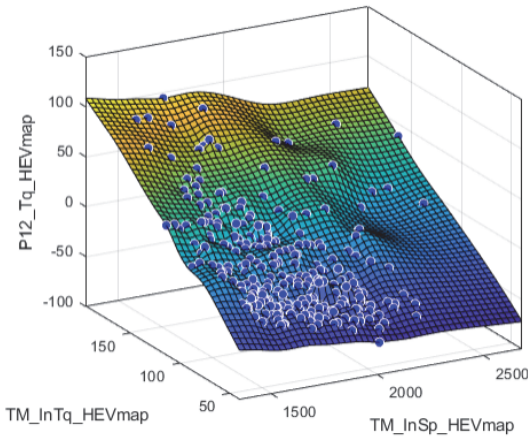


Fig. 7 Motor torque control map of hybrid mode

3.3 P1-P2 모터 토크 최적분배

Fig. 7을 통해 P1모터와 P2모터의 합산 토크를 도출할 수 있으며, 전력 소비량을 최소화하기 위해서는 두 모터 간의 토크분배 최적화가 필요하다. 모터의 요구 합산 토크가 정해지면 두 모터의 토크 분배비에 의해 P1과 P2모터의 토크가 결정된다. 이때, 토크 분배비에 따라 동일한 합산토크 내에서도 소모전력 파워가 변화하게 된다. 변속기 입력축 속도 및 요구 합산 토크에 대해 전력소모를 최소화하기 위한 P2토크를 도출하면 Fig. 8과 같이 나타난다. 이렇게 도출된 맵을 $f_{T_{m2opt}}$ 로 정의하면 식 (11)과 식 (12)를 통해 P1 및 P2의 최적 토크를 결정할 수 있다.

$$T_{m2}^* = f_{m2opt}(T_{m12}^*, \omega_i) \quad (11)$$

$$T_{m1}^* = T_{m12}^* - T_{m2}^* \quad (12)$$

3.4 배터리 SOC 관리방법

백워드 시뮬레이션 모델에서는 시작 SOC와 최종 SOC를 결정해놓고 변비를 최적화하기 위한 SOC 경로가 결정된다. 백워드 시뮬레이션 결과를 기반으로 제어맵을 생성하여 포워드 시뮬레이션 모델에 적용하여 제어 성능을 검증할 수 있다. 이때, 백워드 해석시 사용한 것과 동일한 주행사이클을 적용하면 포워드에서의 SOC 패턴이 백워드결과와 유사하게 나타날 수 있지만, 다른 주행사이클을 사용하는 경우 과충전 또는 과방전이 되며 최종 SOC 값이 발산할 수 있다. 또한 해당 제어로직으로 실제로 주행을 하게되면, 적정 SOC를 유지하는데 어려움이 존재한다.

따라서 실제로 주행환경까지 고려한다면 SOC가 높을 때는 배터리의 과방전을 유도하고, SOC가 낮을 때는 과충전을 유도하여 적정 레벨의 SOC 유지 제어가 필요하다. 본 논문에서는 SOC관리를 위해 Fig. 9와 같이 SOC 영역을 5개의 Stage로 나누어 각 영역별로 서로 다른 제어맵을 적용할 수 있도록 하였다. SOC Stage 전환 기준에는 히스테리시스를 적용하였다. Stage 별 제어특성은 Table 1과 같다.

SOC stage에 따른 모터 제어맵을 생성하기 위해 Fig. 10과 같이 시작 SOC와 최종 SOC를 다르게 설정하여 백워드 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통해 Stage 별 하이브리드모드 전환 조건을 Fig. 11과 같이 도출하였으며, 과충전 및 과방전을 유도할 수 있는 모터 토크 제어맵을 Fig. 11과 같이 도출하였다.

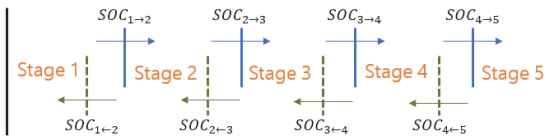


Fig. 9 SOC control stage

Table 1 Control characteristics by SOC stage

	Control characteristics
Stage 1	Fail safe (maximum charging)
Stage 2	Induce SOC overcharge
Stage 3	Optimal fuel efficiency control
Stage 4	Induce SOC overdischarge
Stage 5	Fail safe (maximum discharging)

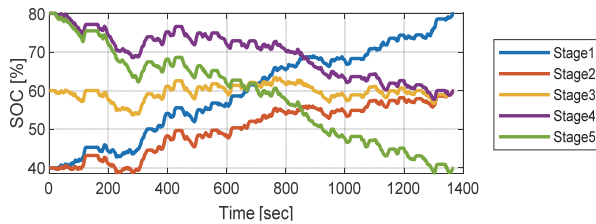


Fig. 10 Backward simulation SOC result by 5-stage

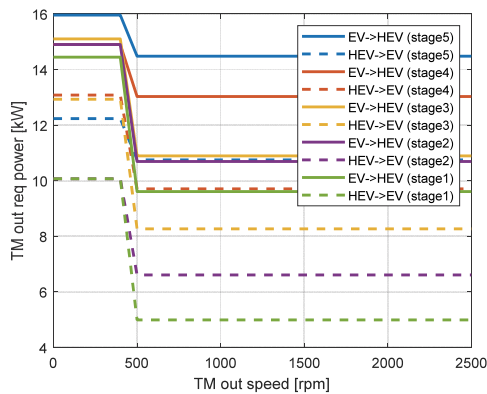


Fig. 11 Hybrid mode shift map by SOC stage

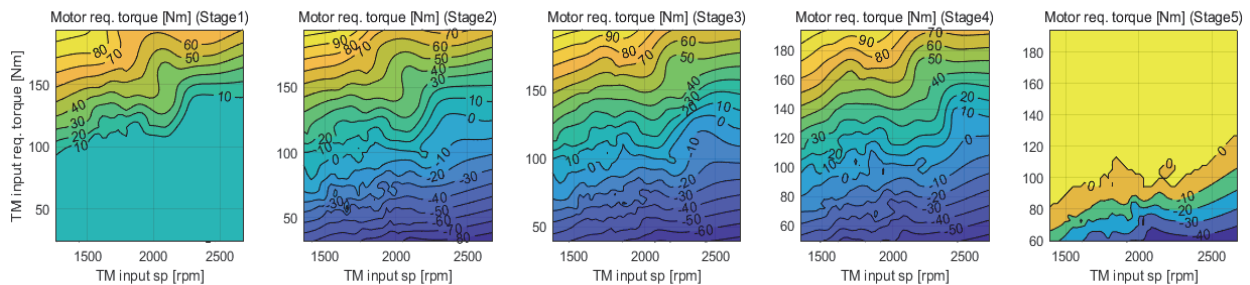


Fig. 12 Backward simulation results based on SOC

4. 시뮬레이션 모델

4.1 포워드 시뮬레이션 모델

제어로직을 검증하기 위해 Fig. 13과 같이 포워드 시뮬레이터를 MATLAB simulink를 통해 구성하였다. 연료, 엔진, 모터, 클러치, 변속기, 차동기어, 휠타이어, 차량, 주행부하, 배터리, 등의 기계적 Plant모델을 구성하였으며, 주행사이클 추종을 위한 운전자모델, 시스템 제어를 위한 TCU, 브레이크 제어기, 하이브리드 제어기(HCU)를 적용하였다.

포워드 시뮬레이터를 통해 연비해석 사이클의 주행 시뮬레이션을 수행하여 연비 특성을 분석할 수 있다. 또한 제어로직에 의한 하이브리드시스템 제어특성 및 연비를 분석할 수 있다.

4.2 하이브리드 시스템 제어로직

하이브리드시스템 제어로직의 개념도는 Fig. 14와 같다. SOC stage 판단, 하이브리드 제어모드 결정, 엔진-모터 토크분배, P1-P2모터 토크분배 제어로직으로 구성되어 있다. SOC stage는 Fig. 9의 방법을 통해 결정된다. 하이브리드 제어모드 결정은 Fig. 12의 맵을 통해 결정할 수 있다. 엔진-모터 토크 분배는 Fig. 11의 제어맵과 식 (9)를 통해 결정된다. 또한, P1-P2모터 토크분배는 Fig. 8의 제어맵을 통해 구할 수 있다.

Fig. 14의 제어로직 컨셉을 기반으로 MATLAB simulink에서 Fig. 15와 같이 제어로직을 구성하였다.

5. 시뮬레이션 결과

5.1 연비 해석 시뮬레이션 검증

4장에서 구축한 포워드 시뮬레이터를 통해 FTP72 주행 모드를 시뮬레이션하였을 때 엔진 및 모터의 작동점 결과는 Fig. 16과 같다. 백워드 시뮬레이션을 수행하여 도출된 Fig. 4와 유사한 작동점 분포를 보이는 것을 확인할 수 있다.

백워드 시뮬레이션과 포워드 시뮬레이션의 배터리 SOC 및 연료소비량 결과를 비교하면 Fig. 17과 같이 나

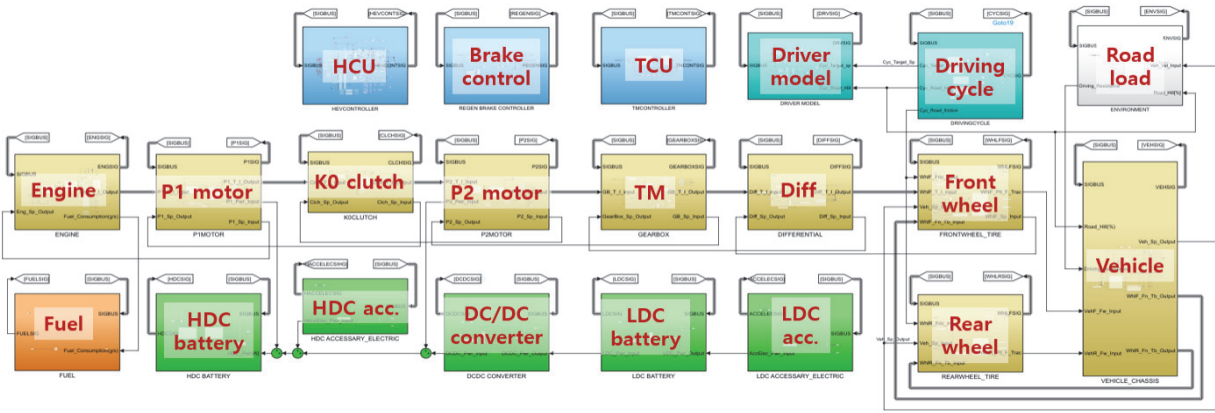


Fig. 13 Hybrid system forward simulator

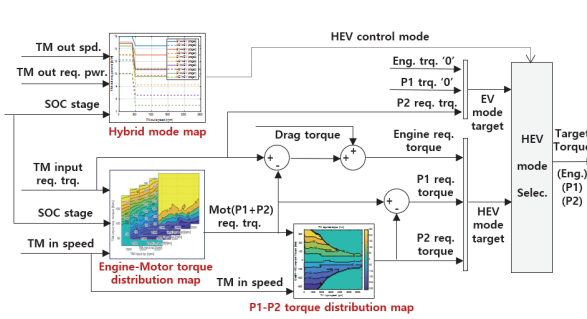


Fig. 14 P1-P2 hybrid system control logic concept

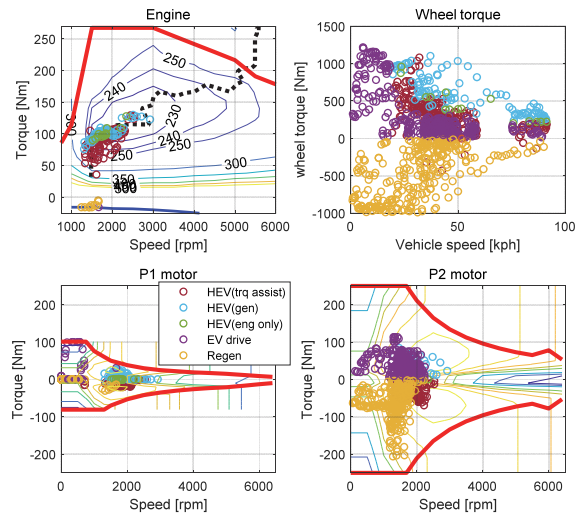


Fig. 16 Operation points of forward simulation

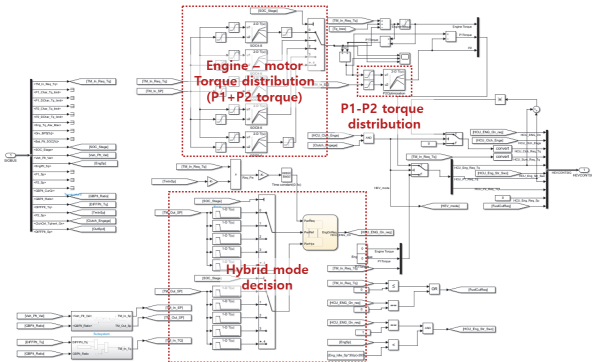


Fig. 15 P1-P2 hybrid system control logic(simulink)

타난다. 연비 결과를 비교하면 Table 2와 같으며, 백워드와 포워드 시뮬레이션 연비해석 오차는 8.18%로 확인되었다. 포워드 모델에서는 엔진 시동 제어, 변속 제어 등이 포함되어 백워드에 비하여 연료소모가 높게 나타난다. 또한, 포워드 모델에 최적 제어맵을 적용하였지만 백워드에 비하면 연비 최적에서 벗어나는 작동점이 존재할 수 있다. 하지만 SOC 결과를 보면 두 결과가 유사한 경향을 보이고 있으므로, 백워드 결과를 추종하는 최적 제어가 이루어지고 있다는 것을 확인할 수 있다.

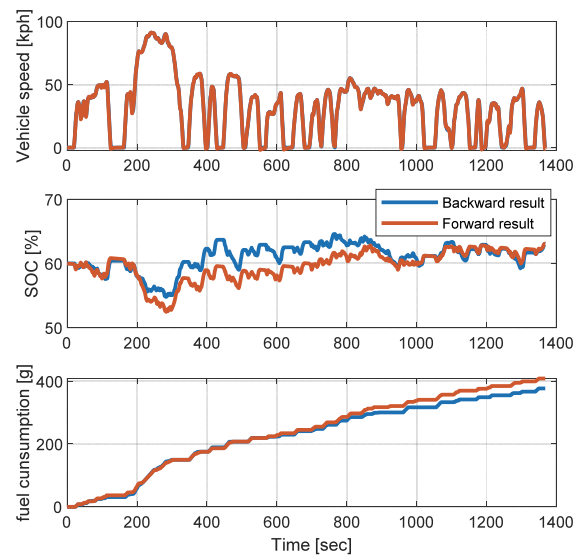


Fig. 17 Comparison of forward and backward results

5.2 배터리 SOC 제어특성 검증

본 연구에서 개발된 제어로직은 FTP72 주행 사이클을 기반으로 최적화되어있기 때문에, FTP72 사이클에서는 시작 SOC와 최종 SOC가 동일한 수준으로 나타났지만, 다른 주행사이클 또는 실도로 조건에서는 SOC가 과도하게 충전되거나 방전되면서 적정 SOC 영역에서 주행하는 것이 불가능할 수 있다. 따라서 3.4절에서 언급한 제어로직을 적용하여 SOC가 과방전 또는 과충전 영역으로 진입하더라도 중간 범위로 복귀할 수 있도록 하였다. Fig. 18은 임의로 시작 SOC를 과충전(Stage 4,5) 및 과방전(Stage 1,2) 조건으로 해석한 결과이며, SOC가 중간 범위 영역(Stage 3)으로 수렴해 가는 것을 확인할 수 있다.

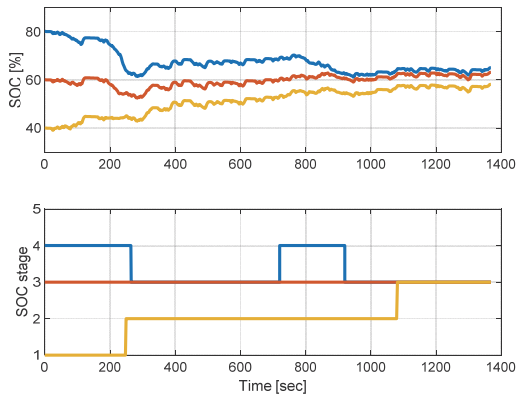


Fig. 18 Simulation results of SOC management control

6. 결론

본 연구에서는 P1-P2모터가 적용된 병렬형 하이브리드 시스템의 규칙기반 제어 방법에 관해 연구하였다. 제어로직 알고리즘을 고안하고 백워드 시뮬레이션 결과를 활용하여 제어맵을 생성하였다. 또한 포워드 시뮬레이터를 구성하여 제어로직을 검증하였으며, 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) EV 및 HEV 제어모드를 결정할 수 있는 제어맵을 도출하였다. 이를 통해 엔진 및 K0 클러치의 On/Off 시점을 결정하였다.
- 2) 엔진과 모터의 토크 최적분배를 위한 제어맵을 도출하였다.
- 3) P1-P2 모터의 토크 최적분배를 위한 제어맵을 도출하였다.

- 4) 백워드 결과를 기반으로 제어맵을 적용하였으며, 포워드 시뮬레이션 결과 연비 21.31 km/l를 확인하였으며, SOC 제어 경향이 백워드와 유사하게 나타나는 것을 확인하였다.
- 5) 배터리 SOC stage를 5단계로 구분하고, 각 Stage별로 다른 제어맵을 적용하여 적정 SOC(stage 3)를 유지할 수 있도록 하였으며, 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

후 기

이 연구는 2023년도산업통상자원부및산업기술평가관리원(KEIT) 연구비지원에의한연구임(00144045)

References

- 1) J. K. Shin, "Prospects and Issues of Safety and Environmental Regulations for Future Vehicles," Auto Journal, KSAE, Vol.43, No.10, pp.25-30, 2021.
- 2) S. H. Park and S. G. Jo, "Domestic and International Policy Trends for the Supply of Zero or Low-Emission Vehicles," Auto Journal, KSAE, Vol.43, No.12, pp.47-51, 2021.
- 3) J. S. Kim and Y. I. Park, "Fuel Economy Analysis of Novel Hybrid Powertrain for PHEV," Transactions of KSAE, Vol.27, No.4, pp.325-332, 2019
- 4) S. M. Byun, B. S. Kim and S. W. Cha, "Deterministic Rule-Based Control Classification for HEV," Korean Society for New and Renewable Energy, pp.357-360, 2008.
- 5) K. Y. Jeong, S. M. Ha and H. C. Lee, "Supervisory Control Algorithm Design of a 48V 4WD Hybrid Electric Vehicle with Fuel Efficiency Analysis," Transactions of KSAE, Vol.26, No.1, pp.131-141, 2018.
- 6) J. Y. Jeong, D. H. Lee, C. W. Shin, D. B. Jeong, K. D. Min, S. W. Cha and Y. I. Park, "Comparison of the Fuel Economy of Series and Parallel Hybrid Bus System Using Dynamic Programming," Transactions of KSAE, Vol.21, No.1, pp.92-98, 2013.
- 7) K. H. Kim, C. B. Kang, W. S. Lim and S. W. Cha, "Optimization of Vehicle Speed in Urban Road Using Dynamic Programming," Transactions of KSAE, Vol.27, No.9, pp.687-692, 2019.