



듀얼 클러치를 가진 플러그인 하이브리드 동력전달 시스템

김진성·김기수·신재훈·박영일*

서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

Plug-in Hybrid Powertrain System with Dual Clutch

Jinseong Kim · Gisu Kim · Jae Hoon Shin · Yeong-il Park*

Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
Seoul 01811, Korea

(Received 7 September 2017 / Revised 6 November 2017 / Accepted 19 December 2017)

Abstract : In order to reduce emissions, eco-friendly vehicles are being developed by car manufacturers worldwide. The plug-in hybrid electric vehicle(PHEV) system, which attracts the attention of consumers in recent years, combines the advantages of an electric vehicle(EV) and a hybrid electric vehicle(HEV). The PHEV system uses a large capacity battery that is charged through a household power source in order to extend the mileage. The PHEV system that can travel long distances with electricity only requires high efficiency electric drive. After the battery is exhausted, the engine must be able to sustain the charge of the battery while driving. Therefore, the loss of power from the engine to the wheels must be small. In this paper, a newly designed system is introduced for the characteristics of PHEV. The system is similar to the parallel TMED type. However, the difference is that a dual clutch is used, a multi-speed transmission is not used, and a motor is attached to each stage. The gear ratio of the system and the capacity of the power source were designed to evaluate the fuel efficiency. The system showed an improved fuel economy of 44.58 %, as compared to the internal combustion engine vehicle(ICEV) in the CS mode that sustained the charge of the battery.

Key words : Plug-in hybrid electric vehicle(플러그인 하이브리드 전기 자동차), Dual clutch(듀얼 클러치), Component sizing(용량 매칭), Dynamic programming(동적 계획법), Backward simulation(후방향 해석)

1. 서론

세계 주요 국가들은 자동차의 배출 가스 저감을 위해 자동차 제조업체들의 평균 연비 규제를 점차 강화하는 추세이다. 그로 인해 세계 각국의 자동차 제조업체들은 EV(Electric Vehicle), HEV(Hybrid Electric Vehicle), PHEV(Plug-in Hybrid Electric Vehicle)와 같은 친환경 차량들을 개발하여 출시하고 있다.

EV는 한정된 용량의 배터리와 배터리의 과도한

충전 시간으로 인해 주행 거리가 제한되는 단점을 가지고 있다. 그리고 HEV는 전기 구동 장치에 비해 효율이 낮은 엔진을 이용하고 있으며, 엔진의 동력을 이용해 배터리를 충전하고 충전된 배터리를 이용해 모터를 구동하는 비효율적인 에너지 변환을 통해 배터리의 SOC(State of charge)를 유지해야 하는 문제점을 가지고 있다. 이에 따라 대용량 배터리를 채용하여 전기 주행 거리를 대폭 향상시킨 PHEV는 많은 소비자들의 관심을 끌고 있다. PHEV는 일

*Corresponding author, E-mail: yipark@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.

반적으로 배터리를 가정이나 충전소로부터 충전된 상태에서 이용하게 된다. 기본적인 제어 방식은 배터리의 SOC가 특정 수준 이하가 될 때까지는 EV처럼 전기 에너지만을 이용하여 주행하는 CD(Charge Depleting) 모드로 구동을 하게 되며, 배터리의 잔량이 특정 수준 이하가 되면 연료를 활용하여 HEV처럼 충전 상태를 유지하는 CS(Charge Sustaining) 모드로 구동하게 된다. 전기 에너지만으로 주행하는 거리가 긴 특성을 가지는 PHEV의 효율적인 작동을 위해서 전기구동에서의 효율을 증대시키고 CS 구간에서도 높은 효율을 유지할 수 있는 동력전달 시스템이 필요하다.^{1,2)}

본 연구에서는 PHEV를 위해 새롭게 고안된 2개의 모터와 듀얼 클러치를 이용하는 동력 전달 시스템을 소개하고 최적의 성능 가지는 기어비 및 동력원의 용량 설계를 하고 연비 성능을 평가한다.

2. PHEV 동력전달시스템

2.1 시스템의 소개

PHEV를 위해 새롭게 고안된 동력전달 시스템은 Fig. 1과 같다. 1개의 엔진과 2개의 모터, 그리고 2개의 클러치를 사용하며 축 간의 동력 전달과 동력 결합을 위해서는 효율이 우수한 외접 기어만을 이용한다. 여기서, 2개의 클러치는 듀얼 클러치로 설계될 수 있다. 대용량의 배터리는 전력변환장치를 통해 2개의 모터에 전기적 에너지를 전달하거나 회생 제동 및 엔진을 이용한 충전을 통해 에너지를 회수할 수 있다.

PHEV는 기본적으로 EV로서 구동이 가능해야 하

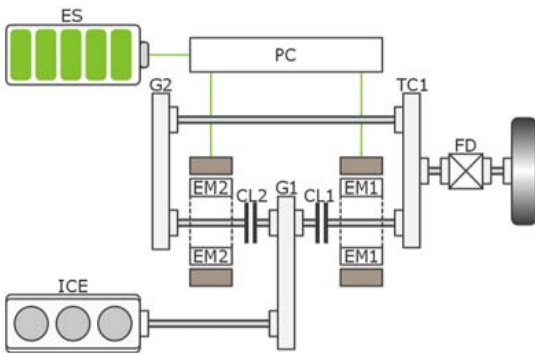


Fig. 1 Novel powertrain system for PHEV

Table 1 Configuration changes according to clutch operation

Drive mode	Clutch 1	Clutch 2
EV	Disengage	Disengage
Parallel - L	Engage	Disengage
Parallel - H	Disengage	Engage

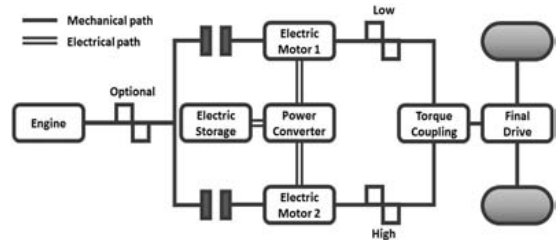


Fig. 2 Schematic diagram of proposed system

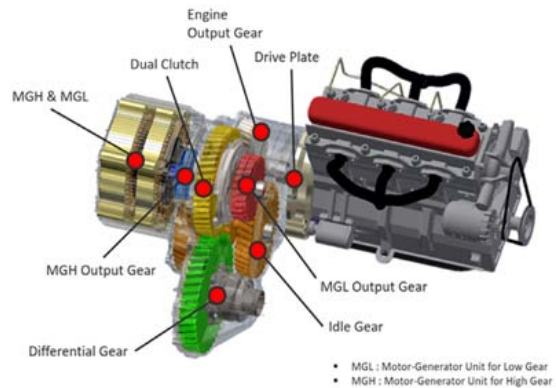


Fig. 3 Design example of proposed system

며 2개의 모터가 기계적으로 동력을 결합하는 병렬 구조로 연결하여 사용하면 모터의 고효율 작동 영역을 더 넓게 이용할 수 있다.

이 시스템은 Table 1과 같이 클러치의 작동에 따라 크게 3가지의 동력 전달 구조로 변환될 수 있다. Fig. 2는 제안 시스템의 개념도이다. 그림에는 2개의 클러치가 표현되어 있지만 클러치의 작동 방식이 기존의 듀얼 클러치와 유사하여 듀얼 클러치를 채용하면 보다 가볍고 조밀한 시스템으로 구성이 가능하다.

제안 시스템은 Fig. 3과 같이 설계될 수 있다. 본 설계 예는 기어를 클러치의 압력 판으로 하는 새로운 구조의 듀얼 클러치를 사용하며 중공축을 이용하여 클러치 양쪽으로 동력 전달이 가능한 구조를 적용하였다.

2.2 동력 전달 모드

동력 흐름은 병렬형 TMED(Transmission Mounted Electric Device) 타입과 유사하지만 별도의 다단 변속기를 사용하지 않는다. 따라서 시스템을 단순하고 가벼우며 저렴하게 구성할 수 있고 상대적으로 효율이 좋은 동력전달계를 구성할 수 있다. 변속기가 없다는 것은 엔진의 작동 구간을 넓게 만들지만 듀얼클러치의 작동에 따라 엔진이 2개의 기어 단을 이용할 수 있도록 구성하여 엔진의 작동 구간을 개선하였다. 클러치의 구속을 통해 3가지의 작동 모드를 가질 수 있다.

2.2.1 EV 모드

EV 모드는 Fig. 4와 같이 2개의 클러치가 분리되어 있을 때는 엔진의 작동 여부와 무관하게 2개의 모터를 사용하여 구동할 수 있다. EV 모드의 운동 방정식은 식 (1) ~ 식 (2)와 같다.

$$m_{veh} \dot{v}_{veh} = \frac{(T_{em1}n_l + T_{em2}n_h)n_{fd}}{R_{tire}} - F_{load} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} R_{tire} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ n_{fd} & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & n_l & -1 & 0 & 0 \\ 0 & n_h & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{whl} \\ \omega_{out} \\ \omega_{em1} \\ \omega_{em2} \\ \omega_{ice} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{veh} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

모터에 다단 변속기가 장착된 것처럼 저속과 고속에서 주로 사용되는 모터를 선택하여 사용함으로써 전기적 효율을 향상시킬 수 있다.

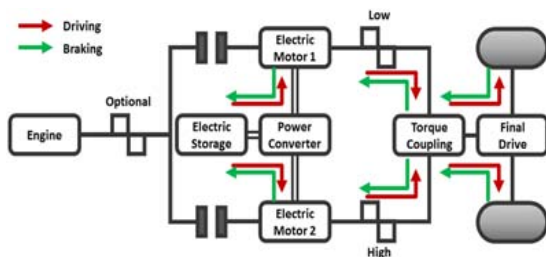


Fig. 4 Power flow of EV mode

2.2.2 Parallel - L 모드

Parallel - L 모드는 Fig. 5와 같이 저속 구간에서는 저단 기어로 연결된 모터 1 측의 클러치를 구속하여 엔진이 저단으로 동력을 전달할 수 있으며 모터들

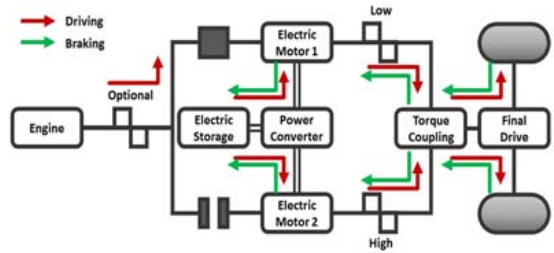


Fig. 5 Power flow of Parallel - L mode

과 토크를 결합할 수 있다. Parallel - L 모드의 운동 방정식은 식 (3) ~ 식 (4)와 같다.

$$m_{veh} \dot{v}_{veh} = \frac{(T_{em1}n_l + T_{em2}n_h + T_{ice}n_{low}n_o)n_{fd}}{R_{tire}} - F_{load} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} R_{tire} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ n_{fd} & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & n_l & -1 & 0 & 0 \\ 0 & n_h & 0 & -1 & 0 \\ 0 & n_{no} & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{whl} \\ \omega_{out} \\ \omega_{em1} \\ \omega_{em2} \\ \omega_{ice} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{veh} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

모터는 차속에 따라 선택적으로 사용될 수 있으며 높은 토크가 요구되는 저속에서는 두 개의 모터를 동시에 사용할 수도 있다.

2.2.3 Parallel - H 모드

Fig. 6과 같이 고속 구간에서는 고단 기어로 연결된 모터 2 측의 클러치를 구속하여 엔진이 고단으로 동력을 전달할 수 있으며 모터들과 토크를 결합할 수 있다. Parallel - H 모드의 운동 방정식은 식 (5) ~ 식 (6)과 같다.

$$m_{veh} \dot{v}_{veh} = \frac{(T_{em1}n_l + T_{em2}n_h + T_{ice}n_hn_o)n_{fd}}{R_{tire}} - F_{load} \quad (5)$$

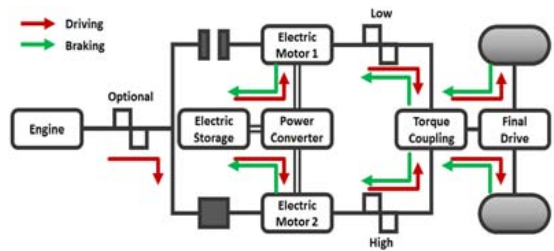


Fig. 6 Power flow of Parallel - H mode

$$\begin{bmatrix} R_{tire} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ n_{fd} & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & n_l & -1 & 0 & 0 \\ 0 & n_h & 0 & -1 & 0 \\ 0 & n_h n_o & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{whl} \\ \omega_{out} \\ \omega_{em1} \\ \omega_{em2} \\ \omega_{ice} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{veh} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

3. 제안 시스템의 용량 매칭

3.1 구성 요소 모델링

사용될 기준 차량의 제원은 K사의 소형 승용차량인 2014년도 해치백 모델이다. 상세한 제원은 Table 2와 같다.

Table 2 Specification of reference vehicle

Item	Value	Unit
Vehicle mass	1360.8	kg
Frontal area	2.0021	m ²
Tire radius	0.3107	m
Drag coefficient	0.33	
Rolling coefficient	0.01	

- 엔진 모델

엔진은 2차원 준정적 맵 형식으로 엔진의 속도와 토크에 따라 연료 소비율을 계산하고 엔진의 속도에 따라 정해진 최대 토크 이상의 토크를 발생시킬 수 없다. Fig. 7은 사용된 기준 엔진의 2차원 연료 소비율 맵과 최대 토크 선도를 나타낸 것이다.

- 모터/발전기 모델

모터/발전기는 2차원 준정적 맵 형식으로 모터/발전기의 속도와 토크에 따라 에너지 변환 효율을

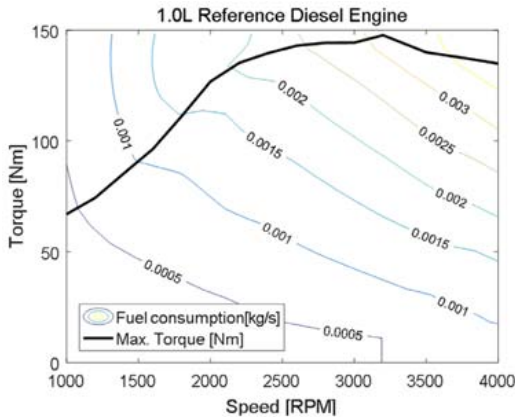


Fig. 7 2D-fuel consumption map of reference engine

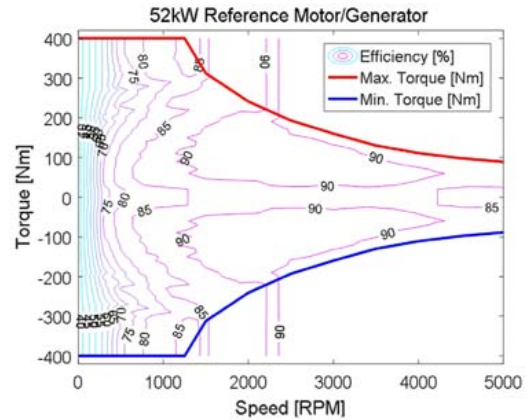


Fig. 8 2D-efficiency map of reference motor/generator

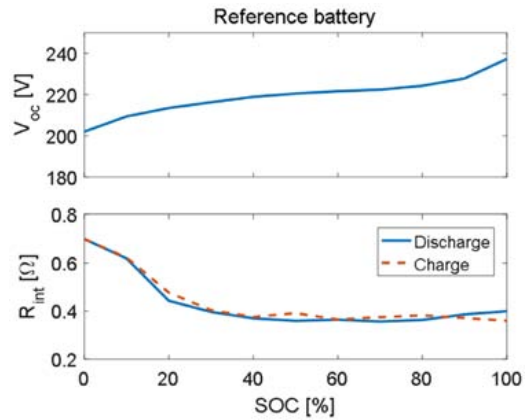


Fig. 9 Internal resistance and open circuit voltage of reference battery

계산하고 모터/발전기의 속도에 따라 정해진 최대 토크 이상 혹은 최소 토크 이하의 토크를 발생시킬 수 없다. Fig. 8은 사용된 기준 모터의 2차원 효율 맵과 최대 토크 선도를 나타낸 것이다.

- 배터리 모델

배터리의 내부 저항과 개회로 전압은 Fig. 9와 같이 SOC에 따라 변한다.

따라서 배터리는 SOC에 따라 변하는 내부 저항과 SOC에 따라 변하는 개회로 전압을 이용하여 단순한 회로로 모델링하였다. 배터리의 출력은 식 (7)로 표현할 수 있다.

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

식 (4)를 통해 다음과 같이 배터리의 요구 출력에

따라 SOC를 알 수 있는 식을 식 (8) ~ 식 (9)과 같이 도출하여 사용한다.

$$\dot{SOC} = \frac{1}{Q_{bat}} \frac{V_{oc} - \sqrt{V_{oc}^2 - 4R_{int}P_{bat}}}{2R_{int}} \quad (8)$$

$$SOC = SOC_{init} + \int_{t_0}^{t_f} \dot{SOC} dt \quad (9)$$

- 주행 부하 모델

차량을 원하는 속도로 주행하기 위해서 차량은 주행 부하인 공기 저항 F_a , 구름 저항 F_r , 등판 저항 F_g 를 이겨내야 한다. 여기서 각 주행 저항은 식 (10) ~ 식 (13)으로 표현된다. 그리고 차량의 요구 힘인 F_{load} 는 이들의 합으로서 나타낼 수 있다.³⁾

$$F_a = 0.5\rho A_f C_d v^2 \quad (10)$$

$$F_r = (C_{r1} + C_{r2}v)m_{veh}g\cos\theta \quad (11)$$

$$F_g = m_{veh}g\sin\theta \quad (12)$$

$$F_{load} = F_a + F_r + F_g \quad (13)$$

3.2 후방향 해석

후방향 해석은 준정적 모델을 구축하고 차량이 주행사이클을 완벽히 추종할 수 있다고 가정하여 이를 위한 최적 제어 입력을 찾는 방식의 해석을 수행한다. 후방향 해석은 별도의 제어를 개발하지 않고도 시스템의 잠재 성능을 확인할 수 있는 장점을 가지고 있어 시스템을 설계하는 과정에서 다양하게 쓰이고 있다.^{4,6)}

이 과정에서 최적 제어 입력을 찾기 위해서 동적 계획법이 사용된다. 동적계획법은 최적성의 원리를 이용한 전역 최적화 기법이다. HEV 해석을 위해 정의되는 최적화 문제는 식 (14) ~ 식 (15)와 같이 정의될 수 있다.

$$\text{Minimize } J = \sum_{k=0}^{N-1} L(x(k), u(k)) \quad (14)$$

$$J_{k,N}^*(x(k)) = \min [L(x(k), u(k)) + J_{k,N+1}^*(x(k+1))] \quad (15)$$

3.3 기어비 설계

설계 변수를 줄이기 위해서 최종감속기어비는 기준 차량에 사용되는 3.83으로 고정하였다. 전기 구동부의 기어비를 선정하기 위해서 엔진의 최소 회전속도는 공회전 속도인 1000 RPM으로 하고 엔진은 최대 4000 RPM까지 작동할 수 있으나 연료 효율 및 배출가스를 고려해 3500 RPM으로 설정 하였다. 그리고 모터들의 최소 회전속도는 정지 상태인 0 RPM으로 설정하였으며 최대 회전속도는 5000 RPM으로 설정하였다. 모터들과 엔진 사이에 있는 엔진 축의 기어 비는 최대한 많은 하이브리드 구동을 위해서 모터와 엔진의 작동 속도 영역이 가장 크게 겹치는 값으로 식 (16)에 의해 얻을 수 있다.

$$n_o = \frac{\max(N_{mot})}{\max(N_{eng})} \quad (16)$$

여기서, N_{eng} 는 엔진의 회전속도 rad/s이며 N_{mot} 는 모터의 회전속도 rad/s이다.

그리고 차량이 주행할 때 엔진은 언제나 작동될 수 있어야 한다. L단의 기어비는 엔진이 최소 회전속도일 때 차량의 최소 기준 속도를 만족해야 한다. 그리고 H단의 기어비는 엔진이 최고 회전속도일 때, 차량의 최대 기준 속도를 만족해야 한다. 그렇다면 L단과 H단의 기어 비는 식 (17) ~ 식 (18)에 의해 얻을 수 있다.

$$n_L = \frac{1}{\min(v_L)} \frac{r_w}{n_{fd}n_o} \min(N_{eng}) \quad (17)$$

$$n_H = \frac{1}{\max(v_H)} \frac{r_w}{n_{fd}n_o} \max(N_{eng}) \quad (18)$$

여기서, v_L 은 엔진이 작동하고 L단으로 동력전달시 차량의 속도 m/s이고 v_H 는 엔진이 작동하고 H단으로 동력전달시 차량의 속도 m/s이다.

엔진이 작동되는 차량의 최소 기준 속도는 20 km/h, 차량의 최대 기준 속도는 170 km/h라고 하면 위 식들로부터 엔진 축의 기어 비는 0.7, L단의 기어 비는 2.1845, H단의 기어 비는 0.8995를 사용하는 것이 효과적이라는 것을 알 수 있다. 그러나 이러한 L단과 H단의 기어 비를 실제로 구현하는 것은 매우 어려운 일이므로 단순화하여 L단의 기어 비는 2.2,

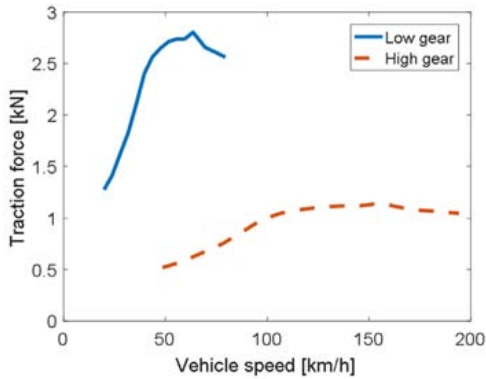


Fig. 10 Engine traction force of proposed system

H단의 기어 비는 0.9로 선정한다.

Fig. 10은 차량의 속도에 따른 엔진의 견인력 선도를 나타낸 것으로서 L단과 H단이 안전하게 변속될 수 있도록 일부 속도 구간에서 중복되어 나타나고 있다. 두 견인력 선도가 중복된 구간이 없거나 서로 분리되어 있다면 주행 중에 엔진이 동력을 전달하지 못하는 구간이 생긴다. CS 모드에서 엔진이 모터나 차축으로 동력을 전달하지 못하면 배터리의 충전량을 유지하지 못하고 점점 고갈되는 문제가 발생한다. 따라서 이러한 문제를 피하기 위해서는 다시 뒤로 돌아가서 더 넓은 속도영역에서 작동될 수 있는 엔진과 모터를 선정해야한다. 그래도 문제가 해결되지 않는다면 차량의 목표 성능을 줄이고 반복 작업을 해주어야 한다.

3.4 동력원 용량 설계

차량의 요구 성능을 만족하는 다양한 용량의 모터를 장착하여 연비 해석을 수행하고 비교하여 최적의 모터 용량을 찾을 수 있다.⁴⁾

3.4.1 최고 속도 성능

실제로 개발되어 출시된 국내의 차량들은 대부분 국내의 모든 도로에서 달릴 수 있으며 최고 속도가 도로의 설계 속도보다는 높게 설정된다. 기준 차량의 최고 속도는 약 170 km/h로 알려져 있다. 따라서 최고 속도 성능은 0%의 경사로에서 170 km/h로 고속 주행이 가능한 것을 목표로 한다.

3.4.2 등판 성능

출시된 동급의 차량이 도로 설계 속도보다 약 1.4

배 높은 속도를 주행할 수 있도록 설계한 것을 참고하여 등판 성능도 기존의 도로 설계 등판각도에 1.4 배를 하여 25%의 경사로에서 20 km/h 이상으로 주행 가능한 것을 목표를 정했다.

3.4.3 동력원들의 용량 범위

L단에 연결되어 비교적 작은 동력을 이용하는 모터 1은 10~30 kW를 사용하고 H단에 연결되어 비교적 큰 동력이 필요한 모터 2는 30~55 kW를 사용하여 총 30가지 조합에 대하여 해석을 수행하였다. 단, 여기서 엔진의 용량은 3 기통의 기준 엔진으로 고정하여 진행하였다.

3.4.4 최적의 동력원 용량

주행 사이클은 UDSS와 HWFET을 이용하고 초기 SOC와 최종 SOC를 동등하게 구속하였으며 해석을 마친 후에는 5 cycle 보정식을 이용하여 복합연비를 계산하였다. 해석 결과는 Fig. 11과 같으며 모터 1은 30 kW, 모터 2는 30 kW일 때 최적의 연비인 27.47(5 cycle 보정식을 적용한 복합 연비)km/l인 것을 확인하였다. 기준 차량의 복합 연비인 19.0 km/l 대비 약 44.58% 향상되었다.

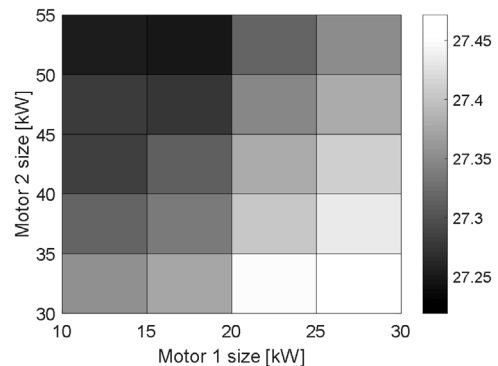


Fig. 11 Optimization for motor sizing

5. 결론

본 연구에서는 PHEV에 필요한 성능을 가지는 새로운 PHEV 동력전달시스템을 개발하였고 다양한 용량의 모터를 장착하여 연비 해석을 수행하고 비교하여 최적의 동력원 용량을 구하였다.

- 1) 새로운 PHEV 동력전달 시스템은 1개의 엔진과 2개의 모터, 그리고 2개의 클러치를 사용하며 의

접 기어를 이용하여 시스템 구성이 가능하다. 2개의 클러치는 듀얼 클러치를 적용할 수 있다.

- 2) 국내의 도로 조건과 기 출시된 차량들을 기준으로 목표 성능을 설정하고 기어 비 및 모터 용량을 설계하여 최적의 잠재 성능을 가지는 조합을 찾았다. 1.0 L급 엔진을 사용하며 L단의 기어 비를 2.2로 하고 H단의 기어 비를 0.9로 할 때, 모터 1은 30 kW, 모터 2는 30 kW 일 때 최적의 연비를 보이는 것을 확인하였다.
- 3) 최적화된 차량에 대한 후방향 시뮬레이션 결과를 통해 CS 구간에서 기준 차량 대비 약 44.58 % 향상된 연비 결과를 얻을 수 있었다. 외부 전원을 통해 충전된 배터리를 활용하여 AER(All Electric Range)을 확장하는 PHEV 구동에 대한 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 산업융합원천기술개발사업 “1리터카급 디젤 하이브리드 원천기술 개발 (10047586)” 과제의 지원으로 수행되었음.

References

- 1) J. Sung, H. Kim and W. Lim, “The Determination of Powertrain Lay out to Improve Fuel Consumption of PHEV(Plug in Hybrid Electric Vehicle),” KSAE Annual Conference Proceedings, p.160, 2015.
- 2) J. Sung, D. Kim, M. Kim and W. Lim, “A Study on the Optimization of New Geartrain Lay Out of PHEV with Considering Transmitted Torque,” KSAE Spring Conference Proceedings, p.86, 2016.
- 3) M. Ehsani, Y. Gao and A. Emadi, Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles, Fundamentals, Theory, and Design, CRC Press, New York, pp.19-65, 2010.
- 4) H. Lee, C. Kang, J. Kim, S. Cha and Y. Park, “Component Sizing for Development of Novel PHEV System,” Transactions of KSAE, Vol.24, No.3, pp.330-337, 2016.
- 5) J. Kim and Y. Park, “Proposal of a Novel Plug-in-hybrid Power System Based on Analysis of PHEV System,” Transactions of KSAE, Vol.23, No.4, pp.436-443, 2015.
- 6) N. Kim, D. Lee, S. Yang, Y. Park and S. Cha, “Optimization for Analyzing Fuel Consumption of HEVs,” KSAE 08-S0336, pp.2042-2047, 2008.