

# PSIM기반의 유성기어를 사용한 직병렬 혼합형 하이브리드 자동차의 파워트레인 모델링

배태석, 임덕영, 최재호  
충북대학교

## PSIM based Modeling of a Series-Parallel Hybrid Electric Vehicle Powertrain Using Planetary Gear

Taesuk Bae, Deokyoung Lim, Jaeho Choi  
Chungbuk National University

### ABSTRACT

본 논문에서는 유성기어를 사용한 직병렬 혼합형 하이브리드 자동차(SPHEV)의 파워트레인 모델링과 하이브리드 자동차의 모드(전기자동차 모드(EV), 엔진 모드, 하이브리드 모드(HEV) 등)변화에 따른 파워 분배 및 동특성 해석에 대하여 기술한다. 내연기관, 전동기, Energy Storage System(ESS)과 같은 구성요소들의 정격은 에너지 개념과 Electrical Peaking Hybrid(ELPH)를 이용하여 설계하였으며, 동특성 분석을 위하여 전력전자 분야 에서 널리 사용되고 있는 시뮬레이션 툴인 PSIM을 이용하여 모델링 하였다.

### 1. 서론

하이브리드 자동차는 자동차 추진에 두 개 이상의 에너지원을 사용함으로써 기존의 내연기관 자동차 대비 적은 배기가스와 높은 에너지 효율을 가질 수 있으며 전기자동차의 단점인 운행거리 제약을 극복할 수 있다. 현재 다양한 하이브리드 동력전달계의 구조가 연구되고 있지만 유성기어를 사용한 직병렬 혼합형 하이브리드 동력전달계가 가장 널리 사용되고 있다. 유성기어를 사용한 직병렬 혼합형 하이브리드 자동차는 기계적으로는 매우 단순한 구조이나 각 축에 물려있는 엔진/발전기/모터의 제어방법에 따라 EV 모드, 엔진모드, HEV 모드의 구동이 가능하며, 직렬/병렬/복합의 동력 전달이 가능하다.

본 논문에서는 이러한 유성기어의 동력 전달 구조를 수학적으로 모델링하고 각 제어 모드별 시스템의 동특성을 시뮬레이션을 이용하여 분석하였다. 동특성 분석을 위해 전력전자 분야에서 널리 사용되고 있는 시뮬레이션 툴인 PSIM을 사용하여 모델링 하였다.

### 2. 파워트레인 구성요소 설계

#### 2.1 유성기어 설계

유성기어는 캐리어와 선 기어, 링 기어 및 유성기어로 구성 되어 있다. 유성기어의 기본적인 식은 선 기어와 링 기어의 캐리어에 대한 상대 속도의 비가 일정한 비율이 되어야 한다는 (1)의 Willis' formula로 부터 유도된다.

$$-\frac{w_s - w_c}{w_r - w_c} = \frac{r_r}{r_s} = \frac{z_r}{z_s} = n \quad (1)$$

여기서  $w_s$ 는 선 기어 속도,  $w_c$ 는 캐리어 속도,  $w_r$ 은 링 기어 속도,  $r_r$ 은 링 기어 반지름,  $r_s$ 는 선 기어 반지름,  $z_r$ 은 링 기어 잇 수,  $z_s$ 는 선 기어 잇 수,  $n$ 은 기어 비를 나타낸다.

(1)에 의해 각 기어들이 각속도는 다른 두 기어의 속도로 표현되는 선형 함수가 되며 캐리어의 각속도는 (2)처럼 표현된다.

$$w_c = \frac{n}{n+1}w_r + \frac{1}{n+1}w_s \quad (2)$$

각 기어의 토크 관계식은 다음과 같다.

$$T_s = -\frac{1}{n+1}T_c \quad (3)$$

$$T_r = \frac{n}{n+1}T_c \quad (4)$$

#### 2.2 감속기 설계

감속기는 하이브리드 자동차에 고속으로 운전되는 전동기의 속도를 일정한 감속비를 적용하여 적당한 자동차 휠의 속도로 바꾸어 준다. 이때 감속기의 입출력 파워는 같아야 하므로 줄어든 속도의 비율만큼 출력 토크는 증가하여 자동차 구동에 필요한 큰 토크를 자동차의 구동륜으로 전달한다.

$$R_g = \frac{2\pi}{60} \frac{n_{m,max} r_e}{v_{max}} \quad (5)$$

여기서  $R_g$ 는 감속비,  $n_{m,max}$ 는 전동기 최대 속도(rpm),  $v_{max}$ 는 자동차 최대 속도(m/s),  $r_e$ 는 타이어 반경(m)을 나타낸다.

표 1 구성요소 설계에 사용된 파라미터  
Table 1 Parameters of Simulation

Parameters	Value
Sun gear teeth number, $z_s$	30
Ring gear teeth number, $z_r$	78
Gear ratio, $n$	2.6
Reduction gear ratio, $R_g$	5.347
Tire radius, $r_e$	0.3 m

### 3. 시스템 구성 및 파워플로우

유성기어는 캐리어에 내연기관이 선 기어에 발전기가 링 기

어에 전동기가 각각 기계적으로 연결되어 내연기관의 출력 토크가 전동기와 발전기로 분배 되도록 함으로써 직병렬 혼합형 파워트레인 구성이 가능하도록 해준다. 그림 1은 유성기어 시스템의 구성을 보여준다.

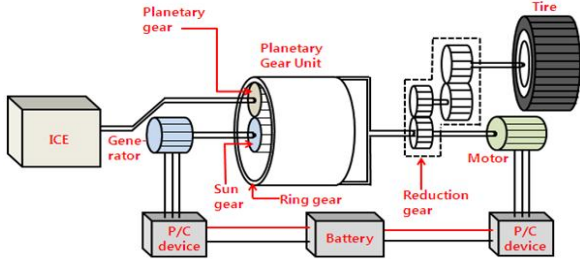


그림 1 직병렬 하이브리드 자동차의 유성기어 시스템 구성  
Fig. 1 Planetary gear unit of SPHEV

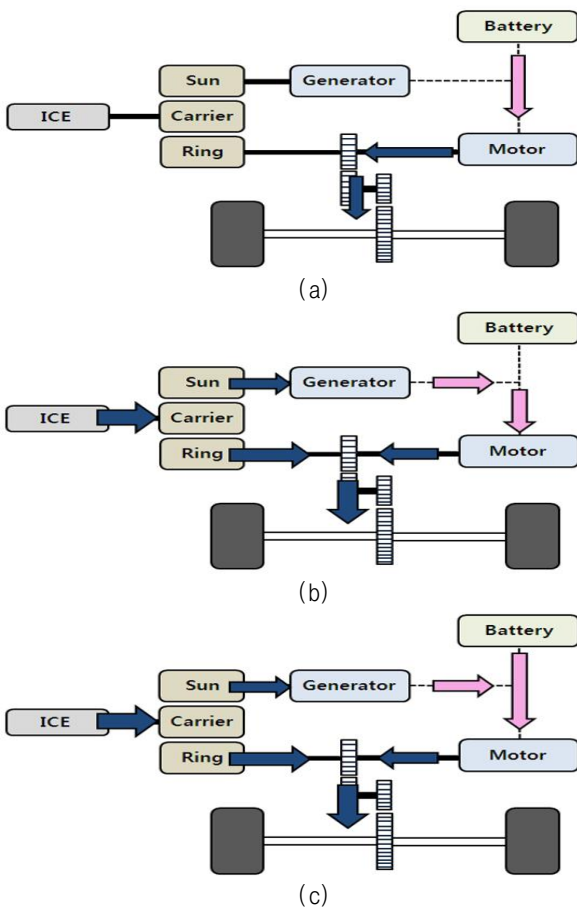


그림 2 모드변화에 따른 파워플로우 (a)EV 모드, (b)엔진 모드, (c)HEV모드<sup>[2]</sup>  
Fig. 2 Power flow (a)EV mode, (b)engine mode, (c)HEV mode

그림 2는 운전전략에 따른 모드 변화에서의 파워플로우를 보여준다. (a)는 전기자동차 모드에서의 파워플로우이며, 자동차의 구동력에 필요한 파워가 오직 배터리파워를 통한 모터에 의해서만 출력되는 것을 보여준다. (b)는 엔진 모드에서의 파워플로우이며, 배터리파워의 출력 없이 엔진 파워만을 이용하여 구동력이 출력되는 것을 보여준다. (c)는 하이브리드 모드에서의 파워플로우 이고, 엔진과 배터리 모두에서 파워가 출력되어 구동력이 얻어지는 것을 보여준다.

#### 4. 시뮬레이션 결과

그림 3은 시뮬레이션의 결과 그래프를 보여준다. 시뮬레이션은 총 32초간 진행되며 25초까지는 가속, 25-30초는 감속(회생제동)되며 그 후 최종적으로 정지된다. 운전전략은 0-2.1초는 EV모드, 2.1-9.8초까지는 엔진 모드, 9.8-25초까지는 HEV 모드, 그리고 25-30초까지는 회생제동 모드로 동작한다. 처음 자동차 구동 시 저속에서의 엔진 효율은 낮기 때문에 배터리파워를 이용한 전동기의 출력만으로 필요한 구동력을 얻는다. 각 기어들의 속도 관계식에 의해 선기어의 속도가 음의 값을 갖는다(EV 모드). 자동차에서 요구되는 구동력이 12kW가 넘는 지점(2.1초)부터 전동기의 구동력만으로는 부족하므로 선 기어 속도제어에 의해 캐리어가 회전하기 시작하며 이때 엔진이 투입되고, 배터리에서는 더 이상 출력을 하지 않는다(엔진 모드). 약 9.8초 부근부터 엔진의 회전속도는 최고속도에 도달하고 배터리가 투입되며, 링 기어의 속도 증가에 따른 속도관계식으로부터 선 기어의 속도는 감소하기 시작한다. 25초부터 회생제동이 시작되며, 선 기어의 속도제어에 의해 캐리어가 서서히 정지되어 지고, 30초부터 차량이 완전히 정지하게 된다.

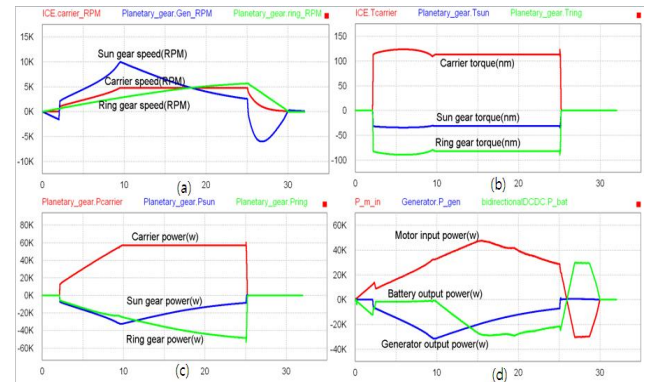


그림 3 유성기어 시스템의 (a)속도, (b)토크, (c)파워, (d)전동기 입력전력과 발전기 출력전력 및 배터리팩 출력전력  
Fig. 3 Planetary gear unit (a)speed, (b)torque, (c)power, (d)motor input power, generator and battery output power

#### 5. 결론

본 논문에서는 유성기어를 사용한 직병렬 혼합형 하이브리드 자동차의 파워트레인을 모델링하고 시뮬레이터를 구성하여 동특성을 파악하였다. 파워플로우 및 동특성 분석을 위해 설계된 구성요소 정격 값을 바탕으로 PSIM 시뮬레이터를 구성하였으며 시뮬레이션 결과 운전전략에 따른 각 구성요소들의 파워플로우와 유성기어의 동작특성에 대하여 확인하였다.

#### 참고 문헌

[1] Deokyoung Lim, Novie Ayub Windarko, Jaeho Choi, "PSIM based dynamic simulator for analysis of SPHEV operation", Power Electronics and Applications(EPE 2011), pp. 1-11, September 2011.  
[2] Yuki Kubo, Satoshi Ogasawara, Masatsugu Takemoto, "Equivalency of Series-Parallel Hybrid System Using Planetary Gear and Hybrid System Using EVT", 8th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia, pp. 571-576, May 2011.