

# 동력 분기 하이브리드 전기 자동차의 운행 모드 시뮬레이션

안국현\*, 조성태, 임원식, 박영일, 이장무

## Operation Modes of a Power Split Hybrid Electric Vehicle

Kukhyun Ahn, Sungtae Cho, Wonsik Lim, Yeong-il Park, Jang Moo Lee

**Abstract** The power split hybrid powertrain is considered to be one of the most prospective configuration for the hybrid electric vehicle (HEV). Toyota Prius, representing this type of vehicle, showed outstanding performances in fuel efficiency, emission reduction and acceleration. The excellence is largely due to the fact that it utilizes almost all operation modes of HEV. Those modes include ZEV (Zero Emission Vehicle) driving, idle stop, fuel cut-off, power assist, active charging, regenerative braking and so forth. In this paper, a few of the mode operations were simulated using AVL Cruise. Also, control logics to operate the powertrain in each mode were developed. The states of powertrain components were displayed and analyzed. By controlling the three components (engine, motor and generator), it was possible to run the powertrain in several hybrid operation modes.

**Key words** Power Split (동력 분기), Hybrid Electric Vehicle (하이브리드 전기 자동차), Forward-facing Simulation (전방향 시뮬레이션), Operation Mode (운행 모드)

\* 서울대학교 기계항공공학부  
 ■E-mail : kahn143@snu.ac.kr ■Tel : (02) 880-8050 ■Fax : (02)801-8788

### 1. 서론

도요타 프리어스가 일본 및 미국 시장에서 큰 성공을 거둠으로써 동력 분기식 하이브리드 동력전달계에 대한 관심은 꾸준히 높아져왔다. 엔진과 모터가 같은 축으로 연결되는 형태의 동력전달계와는 달리 엔진과 차량의 속도가 제너레이터를 통해 분리될 수 있다는 점과 비교적 높은 속도에서도 엔진을 켜지 않은 채로 전기차 모드 주행이 가능하다는 면이 이러한 동력 분기식 하이브리드 전기 차량의 주요 장점으로 분석되었다.

그러나 동력전달계 자체의 효율 특성이 기존의 변속 장치와 크게 달라 엔진 운용도 기존의 방식과는 다르게 이루어져야 하고 최적의 운전을 위해서는 제너레이터의 속도 및 토크가 충분히 확보되어 제어되어야 하는 등 시스템의 특성이 복잡하다는 어려움도 있다<sup>1)</sup>. 따라서 이에 대한 여러 연구가 진행되어 왔다<sup>2,3)</sup>.

본 논문에서는 입력 분기 방식의 유성 기어 하이브리드 동력 전달계의 작동 방식 및 제어에 대해 알아본다. 동력 분기 하이브리드 전기차의 대표적 하이브리드 운행 모드로서 차량 정차시의 시동 및 충전, 전기차 모드 발진과 전기차 모드 주행 시

동, 마지막으로 감속시의 회생 제동에 대해 시뮬레이션한다. 이를 위해 전방향 차량 시뮬레이터인 AVL Cruise 를 이용하였으며, 제어 법칙을 MATLAB / Simulink 를 통해 개발하였다.

## 2. 정차 시 시동 및 충전

동력 분기식 하이브리드 전기 자동차는 일반적으로 정지 상태에서 출발 시 전기 자동차 모드로 운행한다. 그러나 차량의 배터리 충전 상태가 낮은 경우, 출발이나 배터리 충전을 위해 정차 상태에서 엔진을 시동할 필요가 있다.

이를 위해서는 차량이 움직이지 않는 상태에서 제너레이터 속도 제어를 통해 엔진을 원하는 속도로 증속시키는 운행이 필요하다. 단순 시동 시에는 엔진 공회전 속도를 그리고 충전 시에는 엔진 고효율 운전 속도를 목표 속도로 하여 제너레이터 속도 제어를 수행하면 된다. 본 논문에서는 시동 속도는 1000 RPM, 충전 속도는 1500 RPM을 사용하였다. 엔진이 초기에는 마찰 부하로 작용하다가 각각의 목표 속도에 도달하였을 때, 엔진 점화 및 분사가 시작되게 된다.

차량이 정지 상태를 유지하여 운전자가 안정감을 느끼도록 하기 위해서는 마찰 브레이크를 사용하거나 구동축을 영속으로 유지하는 반력 제어를 수행하면 된다. 즉, 모터의 영속 제어를 통해 선 기어와 캐리어의 운동으로부터 생기는 링 기어에서의 반력을 상쇄시키는 제어가 필요하다.

이러한 상태를 구현하기 위해 모터와 제너레이터의 속도 제어를 위한 PID 제어를 구성하였다. 다음 그림은 Cruise 로 구성한 동력 분기식 하이브리드 전기 자동차의 모델이다.

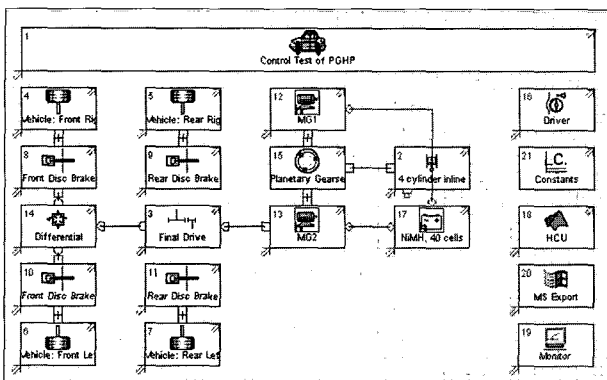


Fig. 1 HEV Cruise model

MATLAB Simulink 를 통해 구현된 HCU 에서 PID 제어를 통해 모터와 제너레이터에 제어 입력을 제공할 수 있도록 하였다.

다음 그림은 구성된 전방향 시뮬레이터와 제어기를 이용해 정차 시 시동 및 충전 모드를 구현한 결과이다. 모터 반력 제어를 통한 차량이 정지 상태로 유지되는 것을 확인하기 위해 모터 반력 제어를 수행하지 않은 결과도 함께 도시하였다.

결과에서 모터 반력 제어를 하지 않을 경우 유성 기어 내부에 생기는 반작용 토크로 인해 링 기어가 낮은 속도로 회전하게 되는 것을 확인할 수 있다. 또한 이를 막기 위해 반력 제어를 수행하는 경우의 모터 토크 변화를 확인할 수 있다.

Fig. 2 의 차량 동력원 속도 그래프에서 시동 후 0.5 초 이내에 엔진 속도가 공회전 속도에 도달하는 것을 확인할 수 있다.

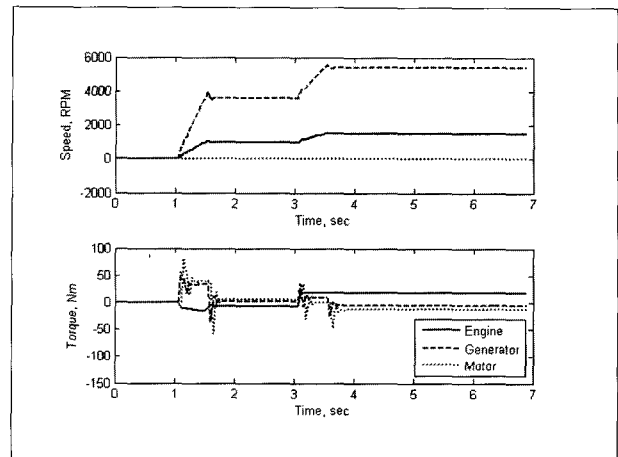


Fig. 2 Engine start at rest

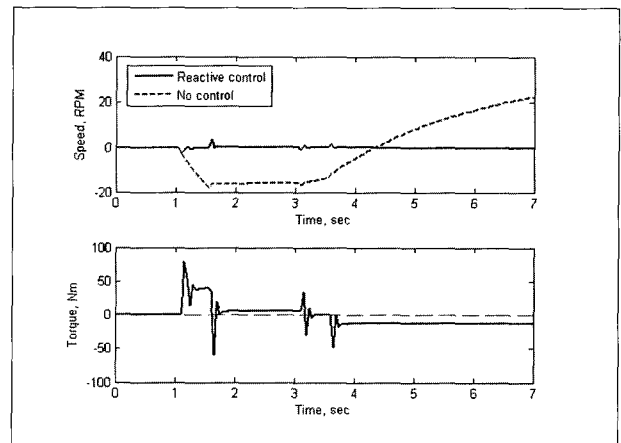


Fig. 3 Reactive control

운행 후 3 초가 되는 시점에서 배터리 충전을 위해 엔진 속도는 1500 RPM 으로 증가되고, HCU 는 30% 의 엔진 부하 신호를 발생하여 배터리 충전을 시작한다. 다음 그림에서 이 때의 연료 소비 상태와 충전 모드에서의 배터리 SOC 의 변화를 확인할 수 있다.

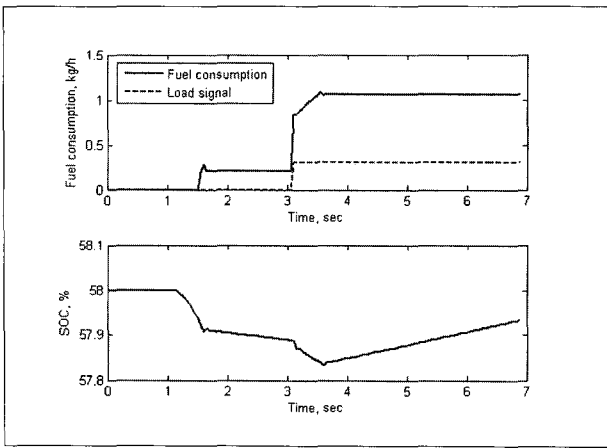


Fig. 4 Fuel consumption and battery SOC

### 3. 전기차 모드 주행과 엔진 시동

하이브리드 전기 자동차가 배터리로부터의 동력만으로 주행하는 것을 전기차 모드 주행이라고 한다. 엔진과 모터의 분리가 불가능한 단일축 병렬형 하이브리드 전기 자동차는 전기차 모드 주행 시에 엔진은 마찰 부하로 작용하게 된다. 따라서 고속에서의 전기차 모드 주행은 사실상 불가능하며, 저속에서도 동력 손실이 커서 전기차 모드 주행으로 인한 이득이 크게 감소한다.

이와는 달리 동력 분기식 하이브리드 전기 자동차는 엔진 속도와 차량 속도의 분리가 제너레이터 속도 제어를 통해 이루어질 수 있으므로, 전기차 모드 주행이 가능하다. 이 경우, 배터리로부터의 동력으로 모터가 구동되고 엔진은 연료를 소비하지 않는다. 제너레이터도 별도의 제어 없이 모터 속도와 엔진 마찰 부하에 의한 속도, 토크 관계식을 만족하며 회전하게 된다.

차량이 전기차 모드로 주행하는 중 운전자로부터의 요구 동력이 증가하게 되거나 배터리 충전 상태가 낮아진 경우, HCU 는 엔진을 시동하여 엔진 연료와 배터리 동력을 함께 사용하는

하이브리드 모드 주행을 구현한다. 이 때, 제너레이터는 엔진 시동 속도 이상으로 엔진 속도를 증가시키도록 제어되고, 이후에 엔진의 점화/분사가 시작된다.

이와 같은 운행 모드를 시뮬레이션하기 위해 Cruise 모델의 HCU 를 구성하였다. 차량이 정지 상태에서부터 15 km/h 까지 발전하고 약 3초간 전기차 모드로 정속 운행한다. 이후 차량 속력이 30 km/h 가 될 때까지 발전하는데, 25 km/h 를 지나면서 엔진을 시동하고 하이브리드 모드로 전환하도록 HCU 가 제어한다. Cruise 시뮬레이터를 이용하여 얻은 결과는 다음 그림과 같다.

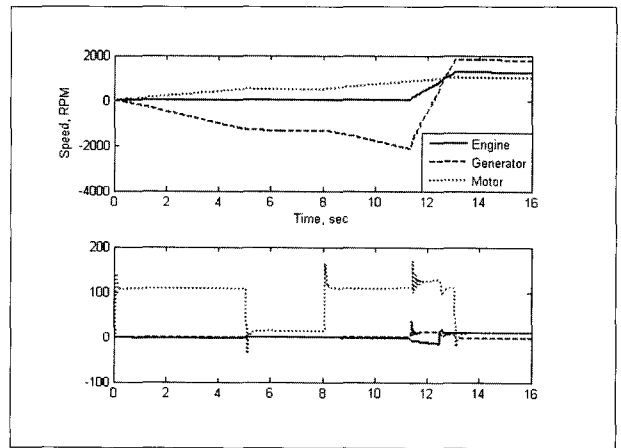


Fig. 5 ZEV driving and engine starting

이 때의 차량 속력과 연료 소비량 그리고 SOC 변화는 다음 그림과 같다.

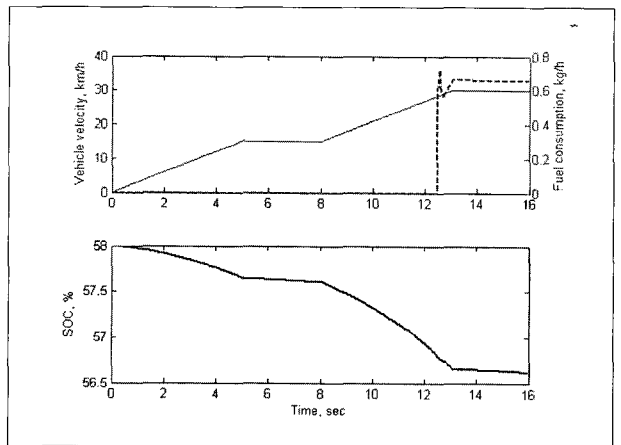


Fig. 6 Fuel consumption and battery SOC

### 4. 감속 운행

차량의 감속 시에 구동 모터는 토크를 흡수하며 차량은 제동되고 이 때의 기계적 에너지는 전기적 에너지로 변환되어 배터리에 저장될 수 있다. 이러한 회생 제동 모드를 시뮬레이션하였다. 이를 위해 차량이 엔진과 모터를 동시에 사용하여 60 km/h 로 정속 주행하다가 5 초 이내에 정지 상태까지 제동하는 상황을 설정하였다. 제동이 시작되면 엔진으로의 연료는 차단되고 제너레이터도 제어되지 않는다. 모터가 발전 모드로 토크를 흡수하면서 배터리를 충전하고 차량은 감속 운행한다. 다음은 이 때의 동력원 속도 및 토크를 도시한 것이다. 아래쪽의 그림에서 큰 토크가 구동 모터를 통해 흡수되는 것을 확인할 수 있다. 엔진은 제동 시에 부하로 작용하며 엔진의 속도가 발산하는 것을 막는다. Fig. 8 에 모터 발전 동력과 배터리 충전 상태의 변화를 나타내었다.

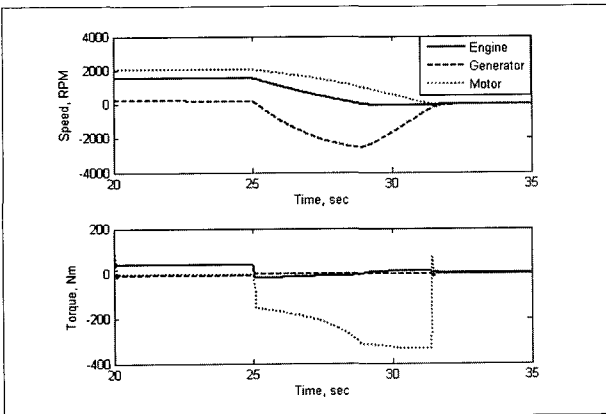


Fig. 7 Regenerative braking

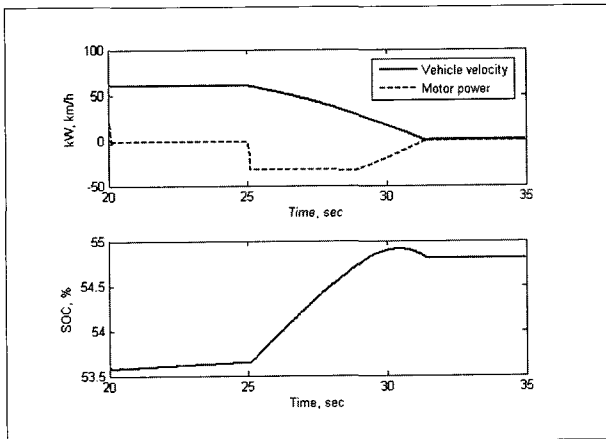


Fig. 8 Motor power and SOC

### 5. 결론

프리어스로 대표되는 동력 분기식 하이브리드 전기차량은 다양한 운행 모드의 운전이 가능하다는 면에서 하이브리드 효과를 극대화할 수 있다. 본 논문에서는 이 중 정차 상태에서의 시동 및 충전, 전기차 모드로의 발전, 전기차 주행 중 엔진 시동 그리고 감속 운행 중 회생 제동을 시뮬레이션하였다. 이를 위해 각 운행 모드에 필요한 제어 알고리즘을 구성하였고 이를 전방향 시뮬레이터의 제어부에 적용하여 차량 구동 상태를 확인하였다.

세워진 제어 법칙에 따라 차량 동력 전달계의 각 요소가 운전되어 각 운행 모드가 구현되는 것을 확인하였다. 또한 이 때의 각 요소의 속도, 토크와 연료 소비율, 배터리 충전 상태 등을 통해 동력 분기식 하이브리드 차량의 각 모드 운행 상태를 파악하였다. 이러한 기본적인 운행 모드 이외에 일반적 운행에 따르는 최적 운행에 대한 연구도 진행 중이며 이에 대한 제어 법칙 구성과 전방향 시뮬레이션을 통한 구현 및 검증도 앞으로의 연구를 통해 이루어질 것이다.

### References

- (1) Characteristics and Analysis of Efficiency of Various Hybrid Systems. Aachener Kolloquium Fahrzeug und Motorentechnik, 2004, pp. 925-957.
- (2) Takaoka, T., Kotani, T., Abe, S. and Ueda, T. Study of the Optimizaiton between Engine and Hybrid System. Aachener Kolloquium Fahrzeug und Motorentechnik, 2003, pp. 869-887.
- (3) Douba, M., Ng, H. and Larsen, R. Charaterization and Comparison of Two Hybrid Electric Vehicles Honda Insight and Toyota Prius. SAE Technical Paper 2001-01-1335.

**안국현**



2000년 서울대학교 기계항공공학부 공학사  
2002년 서울대학교 기계항공공학부 공학석사

현재 서울대학교 기계항공공학부 박사과정연구원  
(E-mail : kahn143@snu.ac.kr)

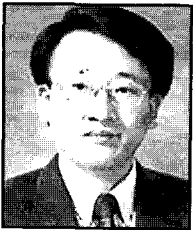
**조성태**



1995년 서울대학교 기계설계학과 공학사  
1997년 서울대학교 기계항공공학부 공학석사  
2002년 서울대학교 기계항공공학부 공학박사

현재 현대기아기술개발연구소 연구원  
(E-mail : banglecat@gmail.com)

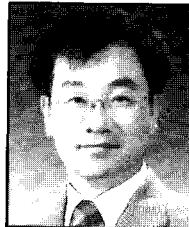
**임원식**



1989년 서울대학교 기계설계학과 공학사  
1991년 서울대학교 기계설계학과 공학석사  
1995년 서울대학교 기계설계학과 공학박사

현재 서울산업대학교 자동차공학과 부교수  
(E-mail : limws@snut.ac.kr)

**박영일**



1979년 서울대학교 기계설계학과 공학사  
1981년 서울대학교 기계설계학과 공학석사  
1991년 서울대학교 기계설계학과 공학박사

현재 서울산업대학교 기계설계자동화공학부 정교수  
(E-mail : yipark@snut.ac.kr)

**이장무**



1967년 서울대학교 기계설계학과 공학사  
1975년 Iowa 주립대학교 공학박사

현재 서울대학교 기계항공공학부 정교수  
(E-mail : leejm@snu.ac.kr)