

PSiM기반의 입력분기방식 하이브리드 자동차의 모드 변환에 따른 동특성 해석

배태석¹, 최재호[†], 임덕영²

PSiM Based Dynamic Analysis of Input Split Type Hybrid Electric Vehicle

Tae-Suk Bae¹, Jaeho Choi[†], and Deok-Young Lim²

Abstract - In this paper, the input split type series-parallel hybrid electric vehicle (SPHEV) is established and the interpretation of the dynamic characteristics in four kinds of HEV modes, such as electric vehicle mode, engine mode, hybrid mode, and regeneration mode, is described. For this research, the forward-facing approach simulation method is chosen, which is useful for vehicle dynamic analysis. The rating of each powertrain component is designed based on energy-based concept and electrical peaking hybrid (ELPH) method. Finally, the designed powertrain is evaluated with the developed PSiM simulator and simulation results are shown.

Keywords: input split type HEV, planetary gear, forward-facing method, PSiM, HEV simulator

1. 서 론

최근 화석 에너지 고갈과 지구온 환경 문제에 대한 관심이 고조되면서 고효율이며 친환경적인 에너지를 속성으로 하는 '그린 파워'가 산업계 전반에 최대 화두로 부각되고 있다. 특히 화석 연료 소모와 배기가스 배출 등의 이유로 에너지 위기와 지구 온난화의 주범으로 지목받고 있는 자동차 산업계는 이러한 분위기에 직접적이고 구체적인 행동을 요구 받고 있으며 이러한 역사적 흐름에 발맞춰 전기 자동차, 하이브리드 자동차 등 친환경 자동차에 관한 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다.^[1]

하이브리드 전기자동차는 기존 차량에서 별도의 투자비 부담이 적으며 기존의 내연기관과 전기 자동차의 특성을 보완함으로써 가속능력 향상 및 배출가스 규제를 동시에 만족시킬 수 있는 가장 현실성 있는 대안으로 부각되고 있다.^[2] 현재 다양한 하이브리드 동력전달계의

구조가 연구되고 있지만 유성기어를 사용한 직병렬 혼합형 하이브리드 동력 전달계가 가장 널리 사용되고 있다.^[3] 하이브리드 자동차의 최적설계는 임의의 운전 패턴에서 자동차가 요구하는 성능을 만족하고 각 구성요소들이 과도한 용량으로 설계되지 않도록 하는 것이며 이러한 맥락에서 하이브리드 자동차 시뮬레이터는 하나의 평가 툴로 사용될 수 있으므로 하이브리드 자동차 개발 시간과 비용을 감소시킬 수 있다.^[4]

현재까지 하이브리드 전기자동차의 파워트레인 동작에 관한 시뮬레이터가 다양하게 연구되었으며, 대표적으로 DOE의 아이다호 국립연구소의 SIMPLEV, 신재생에너지 국립연구소의 ADVISOR, 아르곤 국립연구소의 PSAT 등이 있다.^{[5],[6]}

PSAT과 ADVISOR는 경험적으로 수집된 데이터를 룩-업 테이블과 효율맵 등을 기반으로 구성하기 때문에 차량운행의 급격한 상태 변화의 해석에는 적합하지 못하다. 하이브리드 자동차 시스템의 정밀한 동적 모델링과 시뮬레이션을 위해서는 물리학 기반의 모델링이 필요하며, 대표적인 툴로는 파워심사의 PSiM, 앤시스사의 Simplerer, Texas A&M 대학교의 V-ELPH 등이 있다.^{[7],[8]}

PSiM은 주로 전력변환과 전동기 운전에서 사용되는 시뮬레이터로 프로그래밍과 모듈을 적절히 조합함으로써 하이브리드 자동차의 동적모델링과 파워트레인 동특성

Paper number: TKPE-2012-17-4-11 ISSN: 1229-2214

[†] Corresponding author: choi@chungbuk.ac.kr, Electrical Engineering, Chungbuk Nat'l University
Tel: +82-43-261-2425 Fax: +82-43-276-7217

¹ Electrical Engineering, Chungbuk Nat'l University

² Automation R&D Center, LS IS Co., Ltd.

Manuscript received Feb. 2, 2012; accepted Jun. 11, 2012

분석이 가능하다.^{[9],[10]} 현재 각 구성요소들의 운전특성을 분석하기 위한 통합적인 시뮬레이터의 연구가 부족한 상황이며, 통합적 시뮬레이터를 동적모델을 사용하여 개발하는 것은 하이브리드 자동차 파워트레인의 분석적 접근과 구성요소 최적설계를 위해 선행되어야하는 중요한 과제라 할 수 있다. Forward-Facing 방법은 각 구성요소의 동적모델을 사용하여 파워트레인 동작과 관련된 모든 정보를 얻게 된다. 자동차의 각 구성요소에 동적모델을 사용함으로써 수반되는 막대한 계산량 때문에 장시간의 자동차 운행 시뮬레이션에는 적합하지 않지만 자동차에 사용된 구성요소들의 동특성 해석과 분석적 접근을 위해서는 적합한 시뮬레이션 방법이라 할 수 있다.^[5]

본 논문에서는 동적모델을 사용한 Forward-Facing 방법으로 입력분기방식 하이브리드 자동차의 통합적 시뮬레이터를 구성하였다. 입력분기방식 하이브리드 자동차의 중요한 요소인 유성기어의 특성을 분석하고 각 구성요소들을 모델링 하였다. 또한, 하이브리드 자동차의 일반적인 운전 패턴에 따라서 네 가지의 모드로 분류하여 각 모드에서의 동작을 분석하였다. 전체 시스템은 PSiM을 사용하여 모델링 하였으며 시뮬레이션 결과를 통하여 설계된 시뮬레이터의 타당성을 입증하였다.

2. 유성기어의 구조와 동력 흐름 해석^{[11]-[13]}

그림 1은 유성기어의 구조를 나타낸다. 그림과 같이 유성기어는 캐리어와 선 기어, 링 기어 및 유성 기어로 구성된다. 캐리어는 유성기어들을 고정시켜 주는 역할을 하며 기계적으로 내연기관과 연결되어 있다.^[13] 선 기어에는 발전기가, 링 기어에는 전동기가 기계적으로 연결되어 있으며, 내연기관의 출력 토크가 구동축과 발전기로 분배 되도록 함으로써 직병렬 혼합형 파워트레인 구성이 가능하도록 해준다.

2.1 속도 및 토크 관계식

유성기어의 기본적인 식은 선 기어와 링 기어의 캐리어 기어에 대한 상대 속도의 비가 일정한 비율이 되어야 한다는 식 (1)의 Willis' formula로 부터 유도 된다.

$$-\frac{\omega_s - \omega_c}{\omega_r - \omega_c} = \frac{z_r}{z_s} = n \quad (1)$$

여기서 ω_s 는 선 기어 속도, ω_c 는 캐리어 속도, ω_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 기어비를 나타낸다.

식 (1)에 의해 각 기어들의 각속도는 다른 두 기어의 속도로 표현되는 선형 함수가 되며 캐리어 각속도는 식 (2)처럼 표현된다.

$$\omega_c = \frac{n}{n+1}\omega_r + \frac{1}{n+1}\omega_s \quad (2)$$

선 기어와 링 기어의 토크는 캐리어 토크에 의해 구해지며 관계식은 다음과 같다.

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

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

식 (3)과 식 (4)를 식 (2)에 대입하면 유성기어의 전력 입출력 관계식을 얻을 수 있으며 다음과 같이 나타낸다.

$$T_c \omega_c = \frac{n}{n+1}T_c \omega_r + \frac{1}{n+1}T_c \omega_s \quad (5)$$

식 (5)는 유성기어의 파워 분배를 지배하는 식으로 링 기어 파워는 기계적으로 전동기의 파워와 합쳐지며 선 기어 파워는 발전기를 통해 전기에너지로 변환된다.

식 (2)를 통해서 유성기어의 세 가지 기어 중에서 두 개의 속도는 독립적으로 주어지는 반면 나머지 다른 하나의 속도는 이전 두 개의 속도의 조합으로 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 식 (3)과 식 (4)를 통해서 유성기어의 세 가지 기어 중 하나의 토크만이 독립적으로 주어지며 나머지 두 개의 토크는 독립적으로 주어진 토크와의 관계를 통해 얻어지는 것을 알 수 있다.

2.2 동작 특성

유성기어는 다양한 동작특성을 가지고 있다. 그림 1에서 링 기어는 정방향 회전, 선 기어는 역방향 회전, 유성 기어는 고정된 채로 자전, 그리고 캐리어는 고정되어 있다면 캐리어는 고정되어 있기 때문에 엔진이 동작하지 않는 것을 의미하며 캐리어가 고정되어 있으므로 캐리어에 의해 고정되어 있는 유성기어 또한 공전은 하지 못하고 선 기어와 링 기어의 속도차이에 의해 제자리에서 회전을 하게 된다. 링 기어는 정방향 회전하고 있기 때문에 전동기만이 동작하고 있다는 것을 알 수 있으며, 이것은 전기자동차 모드로 주행하고 있다는 것을 나타낸다. 만약 링 기어는 정방향 회전, 유성기어는 공전, 선 기어는 정방향 회전 그리고 캐리어 또한 정방향 회전하고 있다면, 캐리어가 회전하고 있으므로 엔진이 동작중이라는 것을 알 수 있으며 유성기어가 자전 없이 캐리어의 회전에 따라 공전만을 하고 있으므로 링 기어와 선 기어의 회전속도가 같은 경우인 것을 알 수 있다. 이 경우는 내연기관과 전동기가 모두 동작을 하고 있으므로 하이브리드 모드인 경우를 나타낸다. 위와 같은 유성기어의 동작 특성에 의해 직렬, 병렬, 직병렬 혼합형 동력 전달이 모두 가능하게 된다.

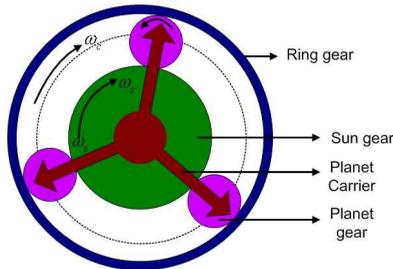


Fig. 1 Structure of planetary gear

Table 1 Parameters and constraints

Parameters	
Ring gear teeth number, Z_r	78
Sun gear teeth number, Z_s	30
Final reduction gear ratio, N_f	5.347
Gear ratio, n	2.6
Tire radius, r	0.3m
Constraints	
Motor	IPMSG, 70kw, 190Nm, 7000RPM Maximum speed
Generator	PMSG, 40kw, 12000RPM Maximum speed
Engine	57kw, 110kw Maximum power, 6000RPM Maximum speed
Battery	Lithium Polymer, 40Ah, 3.7V Norminal Voltage, 55 series connected cells

Table 2 Torque, speed and power of components

Carrier			
V	w	T	P
7(km/h)	0(RPM)	0(Nm)	0(kw)
40(km/h)	2921.9(RPM)	123.6(Nm)	37.81(kw)
100(km/h)	4800(RPM)	113.4(Nm)	57(kw)
Sun gear			
V	w	T	P
7(km/h)	-868.3(RPM)	0(Nm)	0(kw)
40(km/h)	5584.1(RPM)	-34.3(Nm)	-20.07(kw)
100(km/h)	4897.5(RPM)	-31.5(Nm)	-16.15(kw)
Ring gear			
V	w	T	P
7(km/h)	334(RPM)	0(Nm)	0(kw)
40(km/h)	1901.1(RPM)	-89.3(Nm)	-17.77(kw)
100(km/h)	4746.3(RPM)	-81.9(Nm)	-40.71(kw)
Motor			
V	w	T	P
7(km/h)	334(RPM)	130.5(Nm)	4.55(kw)
40(km/h)	1901.1(RPM)	39.1(Nm)	7.78(kw)
100(km/h)	4746.3(RPM)	14.2(Nm)	7.13(kw)
Final drive shaft			
V	w	T	P
7(km/h)	62.2(RPM)	697.9(Nm)	4.55(kw)
40(km/h)	355.7(RPM)	685.9(Nm)	25.55(kw)
100(km/h)	887.5(RPM)	523.3(Nm)	48.63(kw)

2.3 동력 흐름 해석

입력분기방식 하이브리드 구조의 동력 흐름을 해석하기 위하여 사용한 변수들을 표 1에 표시 하였으며, 차량의 속도를 0~120km/h 까지 증가시키면서 분석한 파워

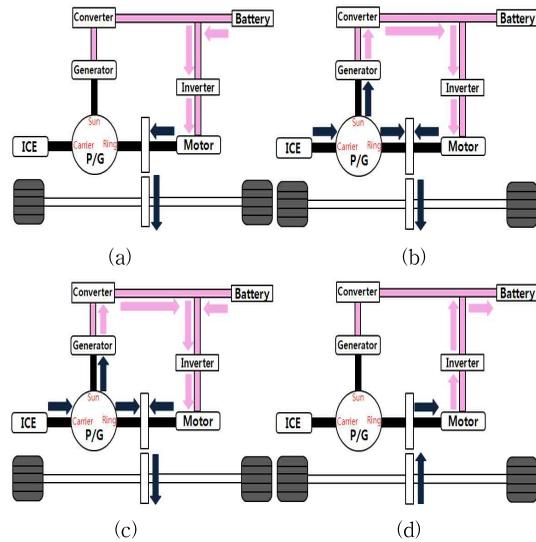


Fig. 2 Power flow of Input split hybrid:

(a) 7km/h, (b) 40km/h, (c) 100km/h, (d) regeneration

트레인의 동작을 표 2에 나타내었다. 유성기어의 각 요소들이 속도 및 토크 관계식에 따라서 동작이 되고 있는 것을 확인할 수 있으며, 구동축 또한 감속기어비와 일치하게 동작을 하고 있는 것을 확인할 수 있다. 표 2의 결과를 바탕으로 그림 2의 동력 흐름을 확인할 수 있다.

3. PSiM을 이용한 파워트레인 모델링

3.1 유성기어 모델

엔진의 동력은 유성기어를 통하여 발전기 및 구동축으로 동력분배가 이루어진다. 구동축으로 분배된 동력은 병렬형 HEV와 같이 차량의 구동에 직접적으로 작용하게 되며, 발전기 쪽으로 분배된 동력은 직렬형 HEV에서와 같이 모터를 구동시키기 위한 에너지원으로 작용하게 된다. 본 논문에서는 유성기어의 수학적 관계식들을 사용하여 그림 3과 같이 모델링 하였다.

3.2 전동기 모델

하이브리드 자동차의 구동을 위한 전동기는 70kW급의 매입형 영구자석 동기 전동기를 선정했다. 전동기 구동을 위한 인버터는 6개의 IGBT를 사용한 3상 모델을 사용하며 공간벡터 전압변조 방식으로 VVVF (Variable Voltage Variable Frequency)를 구현하였다. 그림 5는 본 논문에서 모델링한 전동기 모델이다.

3.3 배터리 모델

배터리는 Enertech, SPB90210260V1 40Ah 리튬 폴리머 배터리의 평균 모델을 사용했다. 하나의 직렬저항과 두 개의 R-C 네트워크를 가지며 각 파라미터 값들은 0.25C 충전 데이터와 0.5C 방전 데이터를 기준으로 추출하였다. SOC에 따른 배터리 사용 범위는 40~80%로 설정하였다.

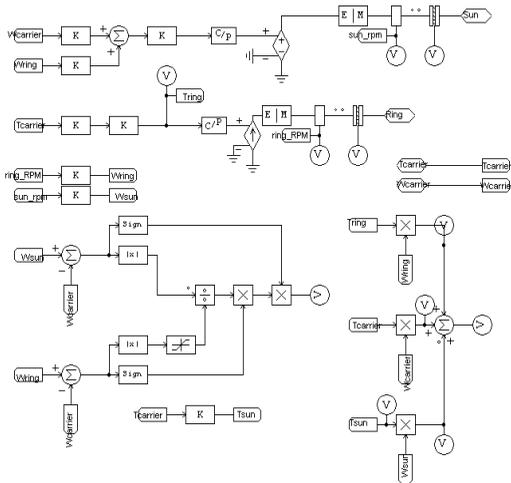


Fig. 3 PSiM model of planetary gear

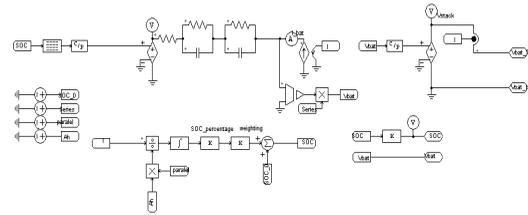


Fig. 7 Model of Li-Polymer battery

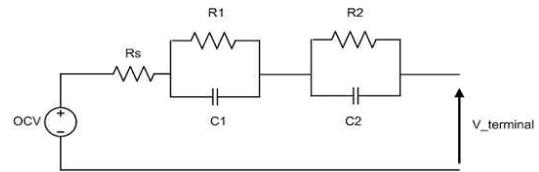


Fig. 8 Model of battery

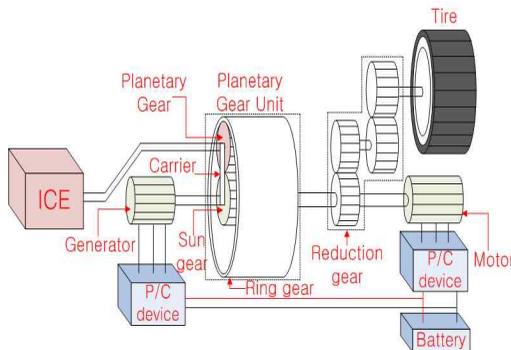


Fig. 4 Planetary gear and powertrain

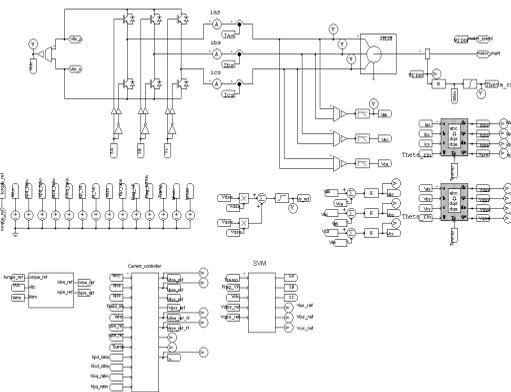


Fig. 5 Model of permanent magnet synchronous motor

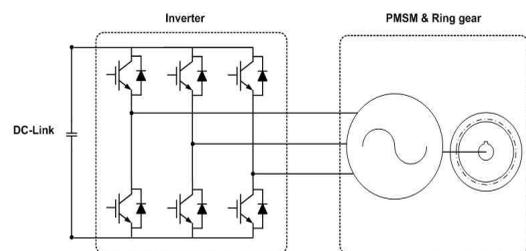


Fig. 6 Block diagram of PMSM

그림 7은 본 논문에서 모델링한 배터리 모델이다.

3.4 SPHEV 전체 모델

그림 9는 상위제어기를 포함한 직병렬 혼합형 하이브리드 자동차 파워트레인의 모델이다. 각 파워트레인은 서브 서킷 형태로 구성되어 있어 필요에 따라 다른 모델로 쉽게 바꾸어 시뮬레이션을 진행할 수 있다. 운전전략의 적용에 있어서 구성요소들의 운전 상태를 모니터링하고 상황에 따라서 각 구성요소들에게 적절한 운전 지령을 내려줄 수 있는 통합형 제어가 필요하며 상위제어기가 그러한 동작을 하게 된다. 상위 제어기에서 내연기관, 발전기, 전동기, 배터리 등의 하위 요소들의 속도, 토크, 전압, 전류 같은 실시간 정보를 입력받아 각 구성요소들 사이에 전력 흐름을 제어함으로써 운전전략에 따라 동작하게 된다.

4. 운전전략 및 모드 분류

4.1 운전전략

본 논문에 적용된 운전전략은 크게 다음과 같다.

- 차량의 저속 운전 시 저속에서 효율이 낮은 내연기관은 동작하지 않고 전기자동차와 같이 배터리에서 출력되는 동력으로만 구동력을 공급한다.
- 구동력이 내연기관의 고효율 구간 (12kW)에 도달하면 내연기관의 운전이 시작되며 배터리 출력은 0이 된다. 이 때 구동력은 전동기와 링 기어 동력의 합에 의해 전달된다.
- 구동력이 내연기관의 정격과위를 초과하면 초과된 구동력은 배터리로부터 공급된다.
- 배터리의 잔존용량이 허용된 최소값인 40%에 다다르면 배터리 출력은 0이 되고 잔존용량이 허용된 최대값인 80%에 다다를 때까지 내연기관으로부터 발전기를 거쳐 배터리가 충전된다.

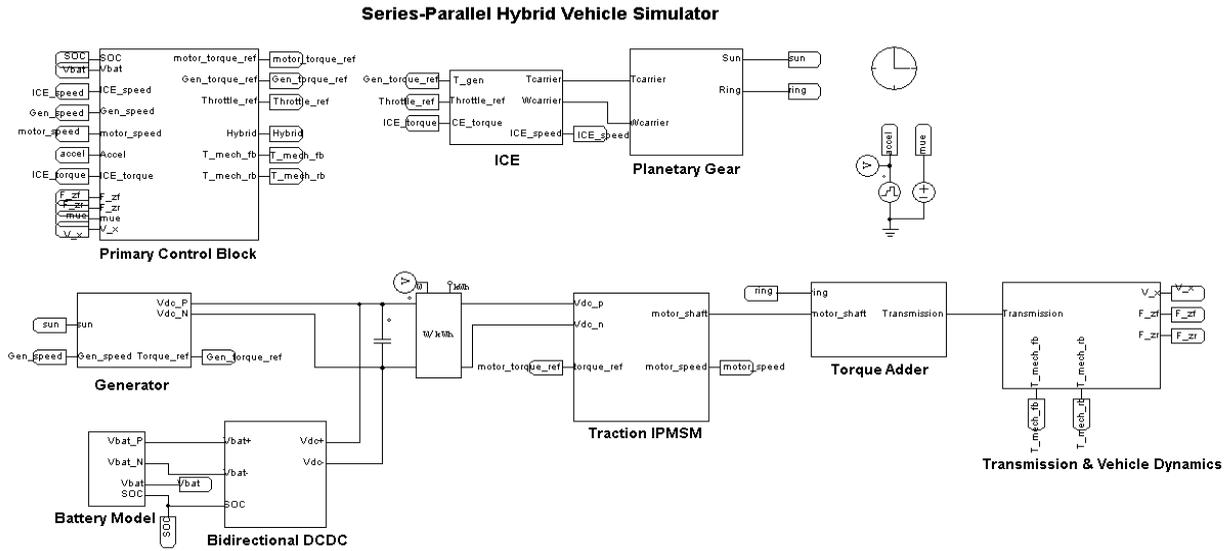


Fig. 9 Model of SPHEV

Table 3 Operation of components

HEV Operation Conditions	Power System Operating Conditions
$a = 1 \wedge P_{req} < P_{hybrid} \wedge SOC > SOC_{low}$ (EV mode)	ICE-off, Battery-discharge, $P_{req} = P_{bat}$
$a = 1 \wedge P_{req} < P_{hybrid} \wedge SOC \leq SOC_{low}$ (EV mode)	ICE-on, Battery-charge, $P_{req} = P_{ICE-O}$
$a = 1, P_{req} \geq P_{hybrid}, P_{ICE-R} \geq P_{req}, SOC > SOC_{low}$ (Engine mode)	ICE-on, Battery-off, $P_{req} = P_{ICE-O}$
$a = 1, P_{req} \geq P_{hybrid}, P_{ICE-R} \geq P_{req}, SOC \leq SOC_{low}$ (Engine mode)	ICE-on, Battery-charge, $P_{ICE-O} = P_{req} + P_{charge}$
$a = 1, P_{req} \geq P_{hybrid}, P_{ICE-R} < P_{req}, SOC > SOC_{low}$ (HEV mode)	ICE-on, Battery-discharge, $P_{req} = P_{ICE-O} + P_{bat}$
$a = 1, P_{req} \geq P_{hybrid}, P_{ICE-R} < P_{req}, SOC \leq SOC_{low}$ (HEV mode)	ICE-on, Battery-charge, $P_{req} = P_{ICE-O}$
$a = 0, SOC < SOC_{hi}$ (Regeneration mode)	ICE-off, Battery-charge, $P_{req} = P_{bat}$
$a = 0, SOC \geq SOC_{hi}$ (Regeneration mode)	ICE-off, Battery-off

• 제동 시 회생전력은 전동기를 거쳐 배터리로 저장된다.

표 3은 수립된 운전전략을 바탕으로 각 모드에서의 구성요소들의 동작을 나타낸 것이다. 표에서 a는 가속 상태, P_{req} 는 필요한 구동력, P_{hybrid} 는 내연기관 구동 파워, SOC는 잔존용량, SOC_{low} 는 배터리 방전제한, SOC_{hi} 는 배터리 충전제한, P_{ICE-R} 은 내연기관의 정격 파워, P_{ICE-O} 는 내연기관의 출력 파워, ICE는 내연기관, P_{bat} 는 배터리 출력 파워, P_{charge} 는 배터리 충전 파워를 나타낸다.

그림 10은 운전전략의 순서도이다. 그림에서 SOC_hi는 0.8, SOC_low는 0.4로 제한되고 SOC가 0.4아래로 떨어지면 배터리는 사용할 수 없으며 0.8이 될 때까지 충전만이 가능하다. V_ref는 차량의 속도 지령, V는 실제 차량 속도, P_req는 필요한 구동력, P_hyb는 내연기관 구동파워, P_ICE는 내연기관 출력 파워를 나타낸다.

4.2 모드분류

그림 11은 차량의 속도에 따른 모드 변화이다. 초기 구동 시인 구간 A는 전기자동차 모드로 0초부터 약 2.1초까지이다. 자동차 구동에 필요한 파워가 내연기관의 정격 파워보다 낮은 B구간은 엔진 모드로 2.1초부터 약

9.5초 까지도. 필요한 구동력이 내연기관의 정격보다 높은 구간인 C는 하이브리드 모드로 9.5초부터 최대 가속 지점인 25초 까지도. 감속구간인 D는 회생제동 모드로 25초부터 정지 지점인 30초 까지도.

4.2.1 전기자동차 모드

저속에서의 엔진의 효율은 매우 낮기 때문에 하이브리드 자동차는 차량의 저속에서의 구동 시 필요한 구동력을 오직 배터리를 통한 전동기의 구동으로 부터 얻게 된다. 이러한 구동은 전기자동차의 구동원리와 같으므로 전기자동차 모드로 명명하였다. 전기자동차 모드의 동력 흐름은 그림 2(a)에 보인 바와 같은데 전기자동차 모드로 동작하기 위해서는 자동차의 요구 동력이 전동기의 한계 동력 보다 낮아야 하며 배터리의 SOC가 충분해야 한다.

4.2.2 엔진 모드

차량의 구동에 필요한 파워가 일정 파워 이상(12kW)이 되거나 SOC 수준이 제한 값 보다 낮아질 경우 엔진을 동작시키게 된다. 필요한 구동력이 엔진의 정격파워

보다 낮은 경우에는 배터리를 사용하지 않고 오직 엔진의 출력 파워만으로 필요한 구동력을 얻게 되므로 엔진 모드로 명명하였다. 엔진 모드에서의 동력흐름은 그림 2(b)에 보인 바와 같다.

4.2.3 하이브리드 모드

자동차의 속도가 고속일 때나 급경사를 오를 때, 또는 급가속시와 같이 높은 출력이 요구될 경우 자동차의 구동에 필요한 파워가 엔진의 정격파워를 초과하면 초과된 파워는 배터리의 방전을 통하여 충족시키게 된다. 엔진과 배터리 모두에서 파워가 출력되므로 하이브리드 모드라고 명명하였으며, 발전기를 통하여 전달되는 파워와 배터리에서 방전 되는 파워가 합쳐져서 전동기를 구동하게 되는데 하이브리드 모드에서의 동력흐름은 그림 2(c)에 보인 바와 같다.

4.2.4 회생제동 모드

감속 시나 내리막길 주행 시와 같이 음의 출력 토크가 요구될 때 모터를 사용하여 제동 에너지를 흡수하며, 회생되는 전력은 전동기를 통하여 배터리를 충전하게 된다. 이 경우 엔진 속도를 0이 되도록 제어하게 되는데 회생제동 모드에서의 동력흐름은 그림 2(d)에 보인 바와 같다.

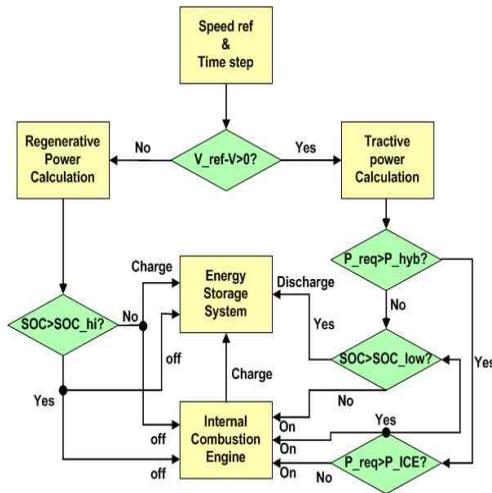


Fig. 10 Flow chart of driving strategy

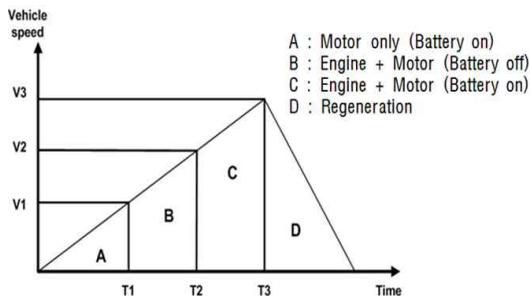


Fig. 11 Mode change with vehicle speed

5. 시뮬레이션 결과

그림 12는 차량의 속도와 구동력을 나타낸다. 그림 12(a)에서 차량은 0초부터 25초까지 가속하여 최대 120km/h까지 속도가 증가하고 25초와 30초 사이에 감속한다. 속도가 증가함에 따라 그림 12(b)에서 구동력이 최대 약 110kW까지 증가한다. 그림 12(c)에서 필요한 구동력이 약 12kW가 넘어가는 지점에서 하이브리드 스위치가 온 되어 엔진이 가동된다.

5.1 전기자동차 모드

그림 13(a)는 전기자동차 모드에서의 배터리전류를 나타낸다. 약 2.1초 까지 방전을 하고 이후 출력이 0이 된다. 그림 13(b)는 배터리의 SOC를 나타낸다. 60%에서 시작하여 배터리 방전에 따라 SOC가 감소한다. 그림 13(c)는 유성기어의 기어들의 속도를 나타낸다. 하이브리드 스위칭이 0의 상태이기 때문에 캐리어는 고정되어 있고 엔진은 동작하지 않는다. 링 기어의 속도는 차량의 속도 증가에 따라 증가하고 선 기어의 속도는 유성기어의 관계식에 의해 음의 속도를 가지게 된다.

5.2 엔진 모드

2.1초부터 하이브리드 스위칭이 1이 되면서 엔진이 동작하기 시작하고 발전기 또한 동작하기 시작한다. 엔진 모드에서는 차량 구동에 필요한 구동력을 모두 엔진에서 출력이 되기 때문에 배터리의 방전이 0이 된다. 그림 14 (a)는 배터리 전류를 보여주며 전기자동차 모드에서

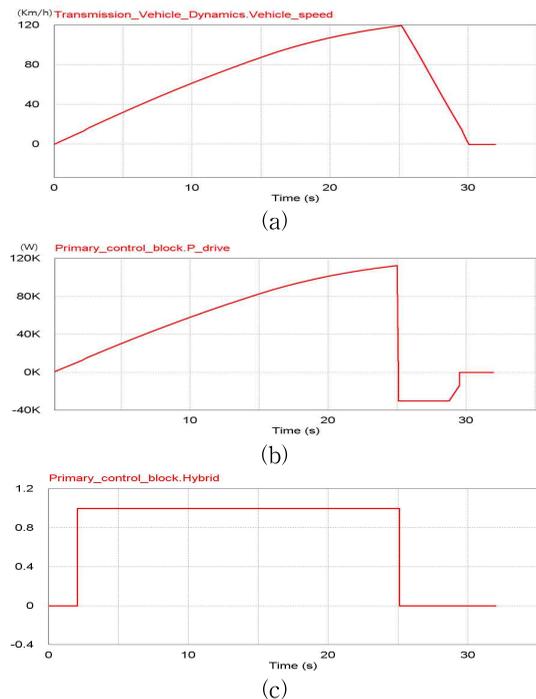


Fig. 12 Speed and traction power of vehicle: (a) Speed, (b) traction power, (c) hybrid switching

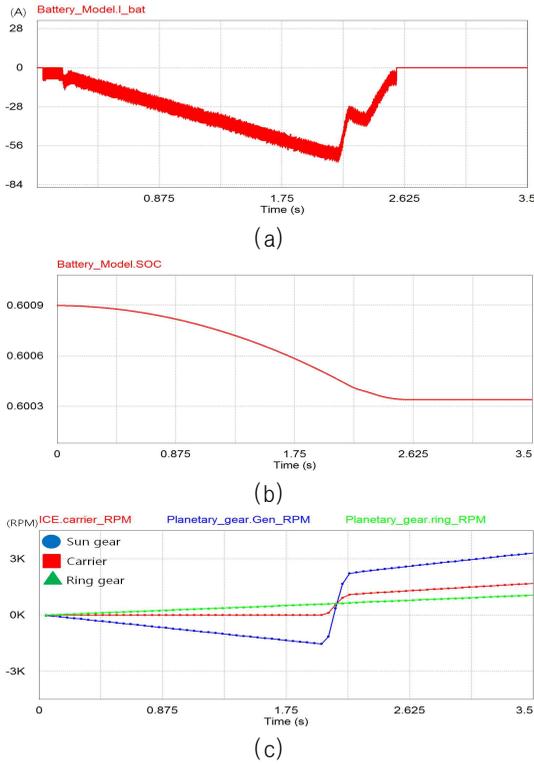


Fig. 13 Results of electric vehicle mode: (a) Current of battery, (b) SOC, (c) speed of gears

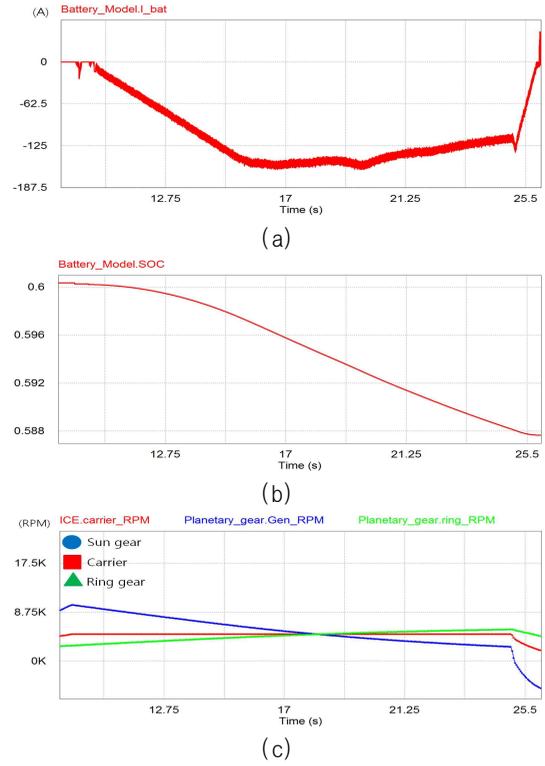


Fig. 15 Results of hybrid mode: (a) Current of battery, (b) SOC, (c) speed of gears

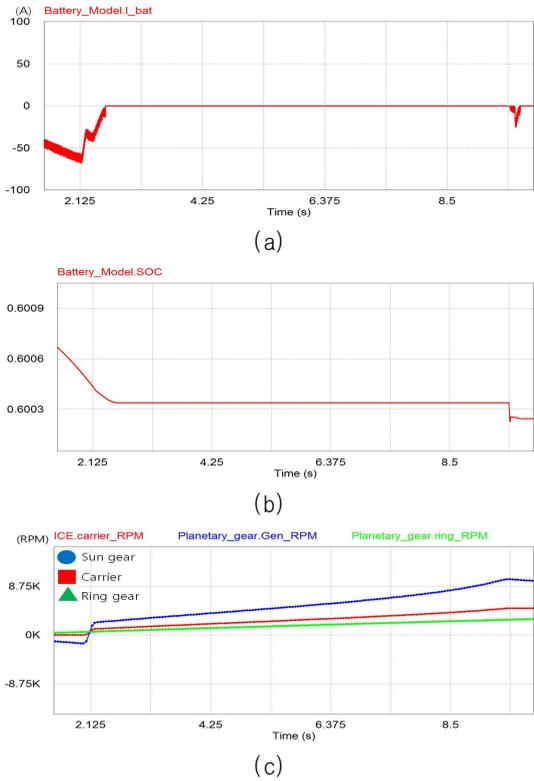


Fig. 14 Results of engine mode: (a) current of battery, (b) SOC, (c) speed of gears

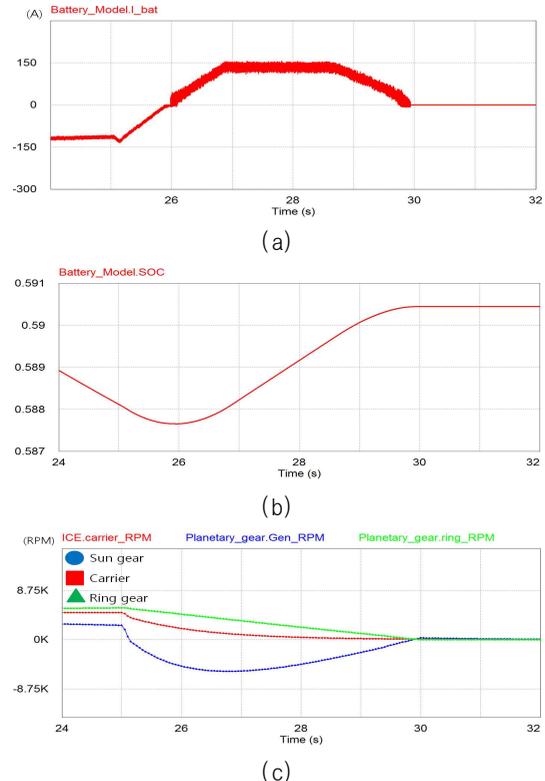


Fig. 16 Results of regeneration mode: (a) Current of battery, (b) SOC, (c) speed of gears

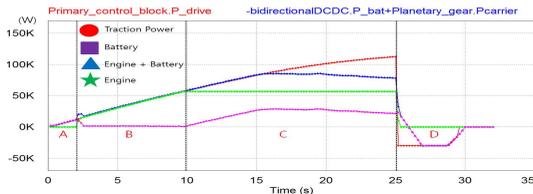


Fig. 17 Output power of engine and battery

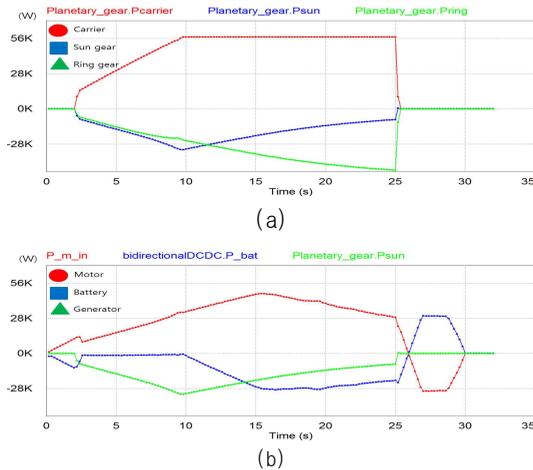


Fig. 18 Output power of Powertrain : (a) Planetary gear power, (b) Motor, Generator, Battery power

방전을 하다가 엔진모드로 들어가면서 배터리 방전이 0이 된다. 배터리의 방전이 없기 때문에 그림 14(b)에서 배터리 SOC감소가 존재하지 않는다. 그림 14(c)에서는 유성기어의 기어들의 회전 속도를 나타낸다. 캐리어가 회전함에 따라 엔진이 구동 되고 링 기어의 속도는 계속 증가하며, 발전기와 연결된 선 기어 역시 양의 속도로 회전을 하며 발전기로 동작하기 시작한다.

5.3 하이브리드 모드

약 9.5초부터 구동력에 필요한 파워가 엔진의 정격파워를 넘어가면서 초과되는 파워는 배터리의 방전으로 얻게 된다. 그림 15 (a)에서 초과되는 파워의 충족을 위해 배터리의 방전이 다시 시작 되는 것을 알 수 있고 그림 15 (b)에서 배터리 방전에 따라 25초의 감속 구간까지 SOC가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그림 15(c)에서 엔진이 정격파워에 도달하였으므로 캐리어의 속도는 일정한 속도로 회전하고 링 기어의 속도는 계속해서 증가하므로 속도 관계식에 따라 선 기어의 속도는 감소하게 된다.

5.4 회생제동 모드

25초부터 차량의 감속이 시작되며 차량의 감속에 의한 회생에너지가 전동기를 통하여 배터리를 충전하게 된다. 그림 16(a)에서 배터리가 회생에너지에 의해 충전이 되면서 전류가 양의 값을 가지게 된다. 그림 16(b)에

서 배터리가 충전됨에 따라 배터리의 잔존용량이 증가하는 것을 볼 수 있다. 그림 16(c)에서 감속구간에 들어감에 따라 링 기어의 속도는 감소하고 하이브리드 스위칭이 0이 됨에 따라 엔진은 정지하게 되고, 캐리어와 선 기어의 속도는 속도 관계식에 의해 속도가 변화하다가 최종적으로 정지구간인 30초에서 0이 된다.

5.5 파워트레인 출력

그림 17은 구동력에 따른 내연기관과 배터리의 출력 파워를 보여준다. 전기자동차 모드인 구간 A에서는 배터리만이 구동력을 충족하게 되고, 엔진 모드인 B구간에서는 내연기관의 동작으로만 필요한 구동력을 충족하게 된다. 하이브리드 모드인 구간 C에서는 엔진의 출력 파워만으로는 필요한 구동력을 만족할 수 없으므로 다시 배터리 출력 파워가 투입된 모습이다. 약 16초부터 25초까지 필요한 구동력을 만족하지 못하는 이유는 엔진과 배터리 모두 정격 용량에 도달하였기 때문이다. 회생제동 모드인 구간 D에서는 엔진은 정지하게 되고 회생되는 에너지를 통해 배터리가 충전되는 것을 확인할 수 있다.

그림 18(a)는 기어들의 출력 파워를 보여준다. 2.1초부터 엔진 모드가 시작됨에 따라 엔진이 동작되고, 캐리어로 출력되는 파워가 선 기어와 링 기어로 분배된다. 그림 18(b)에서 초기 기동 시 배터리의 출력만으로 차량이 구동되며 배터리 출력 파워만큼 모터에서 출력된다. 엔진 모드로 들어가면서 선 기어의 출력 파워가 발전기를 통해 전달되며 발전기와 배터리 출력파워의 합이 전동기로 전달된다.

6. 결론

본 논문에서는 PSiM을 통하여 유성기어를 사용한 입력분기방식 직병렬 혼합형 하이브리드 자동차를 모델링 하였으며, 하이브리드 자동차의 일반적인 운전 패턴에 따라 제어방식을 구성하였다. 또한, 운전전략에 따라 네 가지 모드로 분류하고 각 모드에서의 동특성을 분석하였다. 입력분기방식 하이브리드 자동차의 최적효율제어를 위하여, 유성기어의 관계식을 통하여 동력 흐름을 해석 하였으며, 파워트레인의 동특성분석을 위해 PSiM을 기반으로 Forward Facing 방법을 사용하였다. 시뮬레이션 결과를 통하여 본 논문에서 설계된 시뮬레이터의 타당성을 검증하였고, 직병렬 혼합형 하이브리드 자동차는 효율적인 동력 분배가 가능하며 저속에서의 낮은 효율로 운전하던 기존 자동차의 단점을 전기자동차 모드를 통해 보완할 수 있었으며, 제동 시 마찰에 의해 소비되던 제동 에너지의 일부를 회생하여 배터리를 충전함으로써 연비 또한 향상 시킬 수 있음을 확인 하였다.

본 논문에서 제시된 시뮬레이터는 파워트레인, 차량

의 동적 모델 등의 파라미터 값이 일정한 값으로 정해져 있기 때문에 실제 차량의 동작과는 차이가 있을 수 있다. 동적 모델을 사용하였으므로 차량 운행 시 방대한 계산량 때문에 장시간의 시뮬레이션을 요구하는 특정 운행 패턴이나 연료 소비율 등을 테스트 하는 데는 부적절 하지만 차량 운행 시 파워트레인들의 자세한 동특성 분석에 대해서는 효과적이라고 할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] G.S. Kim, Y.K. Lee, R.G. Park, J. Hur, J.H. Park, B.H. Lee, B.K. Lee, S.M. Lim, "Green car electric power system," *KIPE Technical report*, pp. 1-26, 7. 2010.
- [2] J.M. Kim, H.S. Kim, "Control of Input Split Type Hybrid Electric Vehicle," *KSAE 2008 Founding 30th anniversary conference*, Vol. 4, pp. 2095-2103, 4. 2008.
- [3] D.H. Lee, H.R. Yang, Y.I. Park, S.W. Cha, "Dynamic Analysis of Planetary Gear Hybrid Powertrain with Changing of Mode," *KSAE, 2008 Spring conference*, Vol. 4, pp. 1314-2319, 6. 2007.
- [4] Jun Hou and Xuexun Guo, "Modeling and simulation of hybrid electric vehicles using HEVSIM and ADVISOR," *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, pp. 1-5, Sept. 2008.
- [5] K. B. Wipke, M. R. Cuddy, and S. D. Burch, "ADVISOR 2.1: A User-Friendly Advanced Powertrain Simulation Using a Combined Backward/Forward Approach," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, Vol. 48, No. 6. pp. 1751-1761, Nov. 1999.
- [6] W. Gao and S. K. Porandla, "Design optimization of a parallel hybrid electric powertrain," *2005 IEEE Conference Vehicle Power and Propulsion*, pp. 530-535, Sept. 2005.
- [7] D.K. Lim, J.K. Lim, J.H. Choi, G.B. Chung, "PSIM Simulator for Analysis of Series HEV Operation," *KIPE Journal*, Vol. 15, No. 6., pp. 487-497, 12. 2010.
- [8] Z. Rahman, K. L. Butler, and M. Ehsani, "Designing parallel hybrid electric vehicles using V-ELPH 2.01," *Proceedings of the American Control Conference*, Vol 4, pp. 2693-2697, June. 1999.
- [9] D. W. Gao, C. Mi, and A. Emadi, "Modeling and Simulation of Electric and Hybrid Vehicles," *Proceedings of IEEE*, Vol. 95, No. 4, pp. 729-745, April. 2007.
- [10] S. Onoda and A. Emadi, "PSIM-based modeling of automotive power systems: conventional, electric, and hybrid electric vehicles," *IEEE Trans on Vehicular Technology*, Vol. 53, No. 2, pp. 390-400, March. 2004.
- [11] Aimin Du, Xudong Yu, and Junjie Song, "Structure Design for Power-Split Hybrid Transmission," *Proc. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 884-887, Aug. 2010.
- [12] J.M Kim, Y.H. Kim, J.Y. Kang, S.M. Kim, H.S. Kim, "Power Characteristics for Power Split HEV System," *KSAE 2009 Comprehensive sector conference*, pp. 1414-1421, 4. 2009.
- [13] M. Bertoluzzo, p. Bolognesi, G. Buja, and P. Thakura, "Role and Technology of the Power Split Apparatus in Hybrid Electric Vehicles," *Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, pp. 256-261, Nov. 2007.
- [14] Y. Kubo, S. Ogasawara, and M. Takemoto, "Equivalency of series-parallel Hybrid system using planetary gear and hybrid system using EVT," *2011 IEEE 8th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia*, Jeju, pp. 571-576, May. 2011.
- [15] Liu Jingping, Li Yingchun, Xu Zhengxin, and Xia Xiaolang, "Simulation for series-parallel hybrid electric vehicle powertrain system," *International Conference on Electric Information and Control Engineering (ICEICE)*, pp. 2582-2586, April. 2011.



배태석(裴胎奭)

1986년 12월 27일생. 2011년 충북대 전자정보대학 졸업. 2012년 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



최재호(崔載昊)

1955년 9월 27일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1981년~1983년 중경공업전문대학 전자과 전임강사. 1983년~현재 충북대 전기공학부 교수. 1993년, 1998년, 2003년, 2009년 University of Toronto 객원교수. 2002년 Aalborg University Danfoss 객원교수. 2005년~2008년 당 학회 부회장. 2009년~2011년 Journal of Power Electronics(JPE) Editor-in-Chief. 2012년 당 학회 회장.



임덕영(林德英)

1982년 1월 1일생. 2008년 충북대 전기전자컴퓨터공학부 졸업. 2008년~2009년 AMK FEP부 사원. 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2012년 현재 LS산전(주) 자동차제품연구소 연구원.