

# 바이모달 트램의 직렬형 하이브리드 추진계 성능검토

## Design study of series hybrid propulsion system for a bimodal tram

배 창 한\*      장 세 기\*\*      목 재 균\*\*      이 강 원\*\*      변 윤 섭\*\*  
Bae, Chang-han      Chang, Seky      Mok Jai-kyun      Lee, Kang-won      Byun, Yeun-sub

### ABSTRACT

A bimodal low-floor tram is designed to provide the flexibility of bus and the punctuality of trains together to the passengers. Its propulsion system is a series hybrid type using a set of CNG engine generator and Li-polymer battery.

The present paper describes the specifications of the propulsion system in the bimodal tram which was drawn by a desirable driving cycle. In addition, it shows how the propulsion system of the bimodal tram can be controlled. With using a computer simulation tool of hybrid vehicles, ADVISOR, the performance of the bimodal tram was verified.

## 1. 서 론

최근에 철도가 갖는 정시성의 운행체제와 버스가 갖는 접근성을 혼합한 바이모달 수송시스템이 전 세계적으로 선진 대중교통 수단으로 크게 대두하고 있다. 현재 한국철도기술연구원에서는 전기철도시스템의 경험과 기술을 바탕으로 버스의 접근성과 철도의 정시성을 동시에 구현할 수 있는 바이모달 저상굴절 트램을 개발하고 있다. 바이모달 저상굴절 트램은 기존의 일반도로와 전용도로를 주행할 수 있는 고무타이어 방식으로 자기적 주행궤도를 사용하는 자동운전방식을 채택하며, CNG(Compressed Natural Gas) 하이브리드 추진시스템, 전차륜조향장치등 최첨단의 차량기술을 트램에 적용한 획기적인 교통수단이다[1]. 바이모달 트램의 추진계는 CNG엔진과 리튬폴리머 배터리를 사용하는 직렬형 하이브리드 추진계를 사용한다. 직렬형 하이브리드 타입에 비해 병렬형 하이브리드 추진계는 낮은 초기 비용과 높은 가속 및 구배기동능력을 갖는 장점이 있지만, 배출가스가 많고 도심지 주행 시에 낮은 연비 특성을 갖는다[2]. CNG 엔진은 디젤엔진과 비교하여 HC-90%, CO-30%, Nox-20%로 현저히 감소시킬 수 있어 현재 저상버스를 비롯한 도심지 대형교통시스템에 주로 적용되고 있다[3]. 따라서 경전철 보다는 수용인원이 적으면서 도심지 구간을 운행하는 바이모달 트램에는 CNG엔진을 적용한 직렬형 하이브리드 추진계로 개발중이다.

본 논문에서는 개발중인 바이모달 저상굴절 트램의 CNG 하이브리드 추진계의 구성 및 동작방식에 관해 설명하고, 주행사이클에 기초한 추진계 사양을 제시한다. 바이모달 트램의 성능사양과 기본주행사이클로부터 요구견인력 및 제동력을 계산하고, 엔진, 발전기, 배터리, 보조전원장치등의 요구사양을 결정한다. 또한 직렬형 하이브리드 추진계의 엔진-발전기 셋과 배터리간의 전력분배 제어방식에 관해 설명하고, 바이모달 트램의 추진계 사양 및 특성곡선을 미국 NREL에서 개발한 하이브리드 차량 시뮬레이터인 ADVISOR에 적용하여 바이모달 트램의 주행을 모의하고 성능을 검토한다.

## 2. 바이모달 트램의 추진계 구성

\* 배창한, 한국철도기술연구원 바이모달수송시스템연구단, 정회원

E-mail : chbae@krri.re.kr

TEL : (031)460-5417 FAX : (031)460-5649

\*\* 한국철도기술연구원 바이모달수송시스템연구단

그림 1은 바이모달 트램의 하이브리드 추진계의 전체 개략도를 나타낸다. 추진계는 CNG 엔진-발전기 셋, 추진인버터 및 모터제어기, 리튬폴리머 배터리팩 및 BMS, 감속기, 견인전동기, 추진제어 및 에너지 관리를 수행하는 추진제어기, 차량의 기타 전장품의 구동과 제어전원을 위한 보조전원장치로 구성된다.

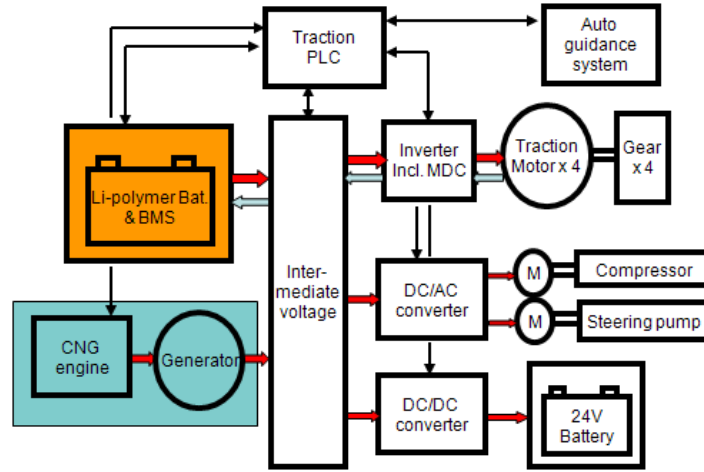


Fig. 1 Schemes of hybrid propulsion system.

바이모달 트램의 견인력 및 제동력 토크지령은 자동운전장치로부터 전달 받으며, Traction PLC에서 엔진-발전기 셋과 배터리간의 전력분담을 제어한다. 단 비상모드 시에는 가속페달 및 제동페달로부터 직접 견인력과 제동력을 전달 받는다. Traction PLC는 트램의 운전석에 설치되며, 엔진-발전기 셋 및 배터리 박스는 엔진룸에 설치되고, 추진인버터 및 모터제어기, 보조전원장치, 냉각장치등은 차량 지붕위에 설치된다. CNG 엔진은 Euro-IV 배출가스 기준을 만족시킬 수 있는 커밍스사의 230HP CNG엔진을 사용하는데, 최대 출력용량은 172kW@2800rpm이고 최대토크는 678Nm@1600rpm이다. CNG 엔진에 연결된 발전기는 3상 영구자석형 동기발전기타입으로, 95%의 효율로 최대 150kW의 전력을 생산할 수 있다. 바이모달 트램의 리튬폴리머 배터리는 80Ah, 52kWh 용량, 전력 및 에너지 출력밀도는 2900W/kg, 120Wh/kg이며, 기존 NiMeh 배터리보다 전력 및 에너지 밀도가 높아 중량 및 사이즈를 최소화시켰다. 배터리박스는 배터리 팩과 BMS(Battery Management System)로 구성되고, 80Ah의 리튬폴리머 전지 8셀을 묶어 1개의 모듈로 구성하였고 총 22개의 모듈로 배터리 팩을 만들었다. 리튬폴리머 배터리는 전압상승에 민감한 특성을 고려하여 직류링크단 전압 제한치는 700[V]로 설정하였다. 또한 제동시 회생전력으로 인한 직류링크단 전압의 과도한 상승을 막기위해 제동초퍼 및 제항기를 설치하였다. 배터리 박스는 엔진룸 하부에 장착되며, 배터리의 과온을 방지하기 위해 CNG 엔진과 배터리간에 보호막과 냉각팬을 설치한다. 견인전동기는 수냉각 방식의 유도전동기로서 소형□경량화를 위해서 감속기와 일체형으로 제작하였고, 2축과 3축 구동을 위해 4개의 견인전동기가 4개의 추진인버터로 구동된다. 보조전원으로서는 각종 컴프레서와 펌프구동을 위한 AC 400V 전원과 차량제어전원인 DC 24V 전원으로 구성되며, 이들을 위한 20kW SIV(Static Inverter),와 6kW DC/DC 컨버터가 개발되었다. 보조전원은 엔진냉각을 위한 인터쿨러, 조향/제동/레벨링을 위한 컴프레서, 발전기 및 견인전동기 냉각용 펌프 구동에 필요한 전력을 담당한다.

바이모달 트램의 추진계는 하이브리드운행, 배터리단독운행, 엔진단독운행의 3가지의 운영모드를 제공한다. 하이브리드 모드에서는 견인 휠모터가 CNG 엔진-발전기와 배터리로부터 전력을 공급받게 되고, 배터리 운행모드에서는 배터리 전력만으로 운행할 수 있다. CNG 엔진-발전기 셋이 정상동작을 하지 못하는 경우나 터널 및 소음제한구역을 운행시 운전자가 배터리 운행모드 스위치를 작동시켜 동작되고, 3km 이하의 제한적인 거리를 zero emission으로 운행할 수 있다. 엔진단독운행모드는 배터리가 정상 동작되지 않을 경우 동작되는데, 엔진-발전기의 출력만을 사용하기 때문에 바이모달 트램의 견인력은 제한적이다.

### 3. 바이모달 트램의 추진계 성능

#### 3.1 기준 주행 사이클

바이모달 트램의 직렬형 하이브리드 추진계의 운행 성능을 결정하고 사양 결정을 위해 기준 주행사이클 선정이 필요하다. 바이모달 트램은 all-out 형태로 주행시 평균속도가 30km/h 이상을 유지하는 것을 목표로 기준 설계 주행사이클을 선정하였으며 그림 2와 같다. 이것은 유럽의 도심지에서 운행되는 트램의 운행패턴을 고려해 만들어진 주행사이클을 참조하여 만든 것이다. 기준 주행사이클의 평균속도는 30.9km/h, 최고속도는 53.4km/h, 주행거리는 500m, 주행시간은 58초이다.

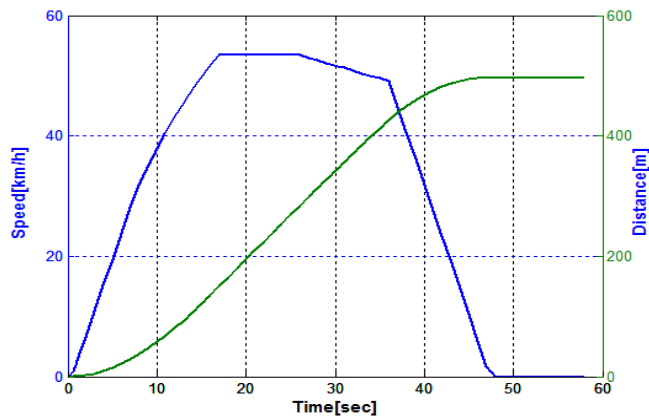


Fig. 2 Speed and distance of design drive cycle.

#### 3.2 견인력 및 제동력

하이브리드 추진계의 기본사양 설계를 위해서는 차량의 최고속도, 가속비, 무게, 기어비, 저항계수등이 고려되어 요구속도를 만족시키기 위한 견인전동기의 최대토크 및 전력을 계산한다. 여기서 계산된 필요 전력은 추진제어장치의 전력분배 알고리즘에 따라, 엔진-발전기 셋과 배터리로부터 공급된다. 감속시에는 견인전동기가 발전기로 동작하여 회생에너지를 만들고 추진 인버터를 거쳐 배터리에 저장되며, 배터리 SOC(State Of Charge)를 높인다. 바이모달 트램은 2 또는 3량으로 구성이 가능하며, 2편성 바이모달 트램의 주요 사양을 표 1에 나타낸다.

Table 1 Vehicle parameters.

Empty weight	17,600 kg
50% loaded weight	21,340 kg
Max. permissible weight	24,950 kg (116 people)
Front area ( $A$ )	$8 \text{ m}^3$
Transmission ratio ( $G$ )	14.42
Aerodynamic drag coefficient ( $C_d$ )	0.6
Rolling resistance coefficient ( $C_f$ )	0.01
Tire radius ( $r$ )	1.042 m
Air density ( $\rho$ )	$1.202 \text{ kg/m}^3$
Max. acceleration ( $0 \rightarrow 25\text{km/h}$ )	$1.2 \text{ m/s}^2$
Max. deceleration ( $38\text{km/h} \rightarrow 0$ )	$1.2 \text{ m/s}^2$
Max. gradient	9%

바이모달 트램의 기본 성능사양은 승객정원을 고려하여 50% 부하조건으로 선정하고, 하이브리드 추진계의 사양을 결정하였다. 표 1의 조건을 만족하는 바이모달 트램의 견인력 및 제동력을 표 2를 사용하

여 계산하였고, 가속시와 감속시의 특성곡선을 그림 3에 나타낸다.

Table. 2 powering and braking power calculation.

Powering	Braking
$P_{aero} = 0.5 \cdot C_d \cdot A \cdot \rho \cdot v_r^3$	$P_{aero} = 0.5 \cdot C_d \cdot A \cdot \rho \cdot v_{br}^3$
$P_{roll} = C_f \cdot M \cdot g \cdot v_r$	$P_{roll} = C_f \cdot M \cdot g \cdot v_{br}$
$P_{wh} = F \cdot v_r + P_{aero} + P_{roll}$	$P_{wh} = -F \cdot v_{br} + P_{aero} + P_{roll}$
$P_{tr} = P_{wh} / \eta_{rg} / \eta_m / \eta_{inv}$	$P_{br} = P_{wh} \cdot \eta_{rg} \cdot \eta_m \cdot \eta_{inv}$

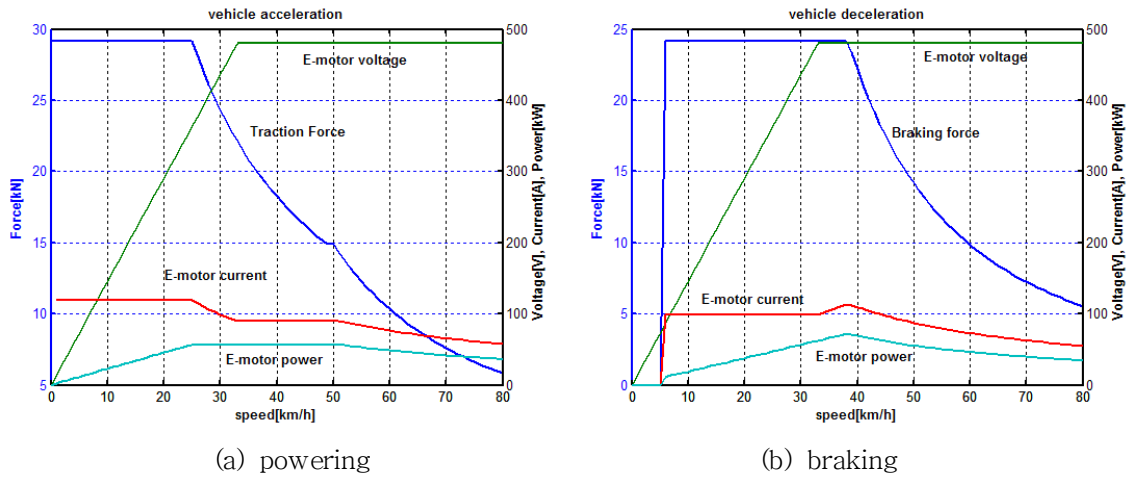


Fig. 3 Powering and braking performance of bimodal tram.

바이모달 트램은 전용선로와 일반도로를 주행하므로 국내에서 규정한 BRT 설계편량을 참조하여 바이모달 트램의 구배능력을 검토하였다. 바이모달 트램의 설계속도 80km/h, 운행조건은 주간선도로로 선정하면, BRT 설계 지침에 의거하여 바이모달 트램이 운행되는 노선의 종단경사는 평지에서는 4%이고 산지에서는 7% 이하가 된다[4]. 그림 4는 바이모달 트램의 등판능력을 검토하기 위해 구배저항을 포함한 주행저항곡선 및 견인력곡선을 나타낸다. 그림에서 보듯이 7% 구배조건에서도 42km/h까지 주행이 가능하며, 12% 구배조건에서 27km/h까지 주행이 가능하다.

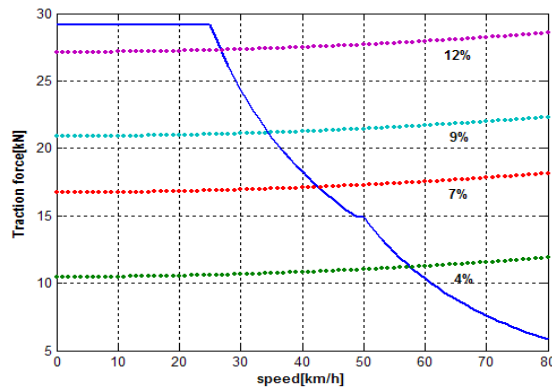


Fig. 4 Traction force and gradability.

그림 5는 바이모달 트램이 하이브리드 모드로 동작할 경우, 각 구성품들에서 요구되는 최고전력을 나

타낸다. 추진계의 정출력영역의 최대 출력인 249kW로부터 각 구성품들의 효율을 고려하여 순시 입출력 전력을 계산한 것이다. CNG 엔진은 2000RPM에서 동작되고 139kW의 출력을 제공한다. 에어컨 동작시 기계식 에어컨 컴프레서에서 요구되는 17kW를 제외한 전력이 발전기로 전달되고 보조전력용량 18kW를 제외한 254kW의 전력이 바이모달 트램 추진에 사용된다. 에어컨 동작시에는 리튬폴리머 배터리는 159kW의 전력을 공급하고, 에어컨 미동작시에는 엔진의 모든 출력이 발전기로 전달되고 배터리 출력전력은 에어컨 컴프레서 소비전력만큼 감소된다.

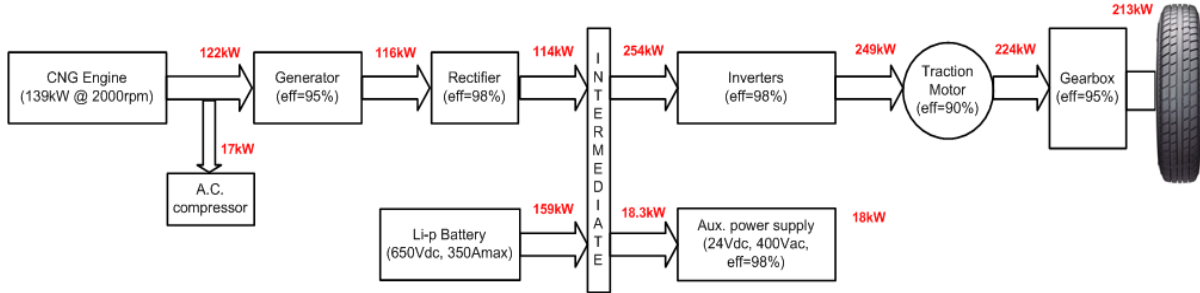


Fig. 5 Power distribution of propulsion system.

### 3.3 전력분배방식

그림 6은 바이모달 트램이 기준노선을 운행시 직렬형 하이브리드 추진계의 전력분배 제어방법을 보여 준다. 속도과형에서 보듯이 운행모드는 가속/정속/타행/제동/정차의 5단계로 구분할 수 있다. 바이모달 트램의 초기 가속시 요구 전력값이 엔진-발전기셋의 출력전력값에 도달할 때까지는 배터리 전력만을 사용하며, 이후 엔진-발전기 셋은 일정한 RPM으로 동작하여 일정 출력을 공급하고 배터리는 부족분만을 담당한다. 가속 시에 소비된 배터리 전력량 만큼 SOC는 낮아지기 때문에 배터리의 SOC를 회복시키기 위해서는 정속 및 타행 운행시 엔진-발전기 셋이 지속적으로 동작하여 배터리를 충전시킨다. 하지만, 초기 낮은 SOC상태로 출발 및 과도한 보조전력사용으로 인한 큰 폭의 SOC 저감의 경우, 정속 및 타행운행시의 엔진-발전기 전력만으로는 배터리 SOC 회복이 불가능하기 때문에, 제동 및 정차 시에도 엔진-발전기 전력을 이용할 수 있다. 바이모달 트램이 요구하는 전력이 엔진-발전기 출력보다 적은 경우에는 엔진은 아이들링 상태가 된다. 과도부하에 대한 전력공급은 배터리가 담당하기 때문에 엔진-발전기 셋은 배터리 SOC를 유지시킬 정도의 일정한 출력만을 제공하면 된다. 따라서 CNG 엔진의 ECM(Engine Control Module)은 추진계 제어기로부터 최적 효율의 속도지령을 받으며, 이후 ECM은 속도 제어와 함께 트로틀제어를 통해 출력전력의 작은 요구량 변화에 대응하는 방식으로 제어된다.

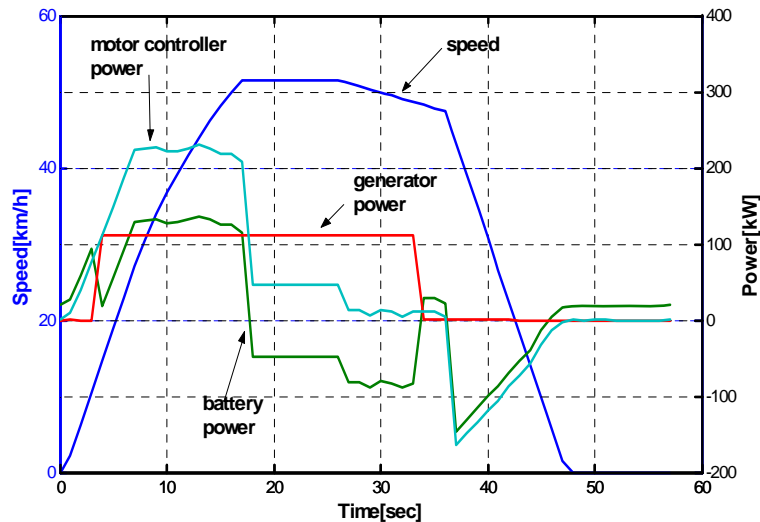


Fig. 6 Batter/generator power sharing.

#### 4. 성능 모의

바이모달 트램의 직렬형 하이브리드 추진계의 성능을 검증하기 위해 Matlab toolbox 기반에서 동작하는 ADVISOR(ADvanced VehIcle SimulatOR)를 사용하였다. 이 프로그램은 미국의 NREL에서 하이브리드 차량 개발을 목적으로 제작된 하이브리드 차량 주행 소프트웨어로서 현재는 상용화 되어 AVL에서 공급하고 있다[5]. 본 논문에서는 ADVISOR 상용화 이전버전인 V.2, 2002년 판을 사용하였고, ADVISOR에서 제공되는 직렬형 하이브리드 차량 기본모델을 바탕으로 차량 제원을 바이모달 트램으로 수정하였다. 표 2는 바이모달 트램의 직렬형 추진계의 구성품들의 기본 사양을 나타내며, 그림 7은 바이모달 트램의 직렬형 추진계를 모의하기 위한 ADVISOR의 기본 블록도를 나타낸다.

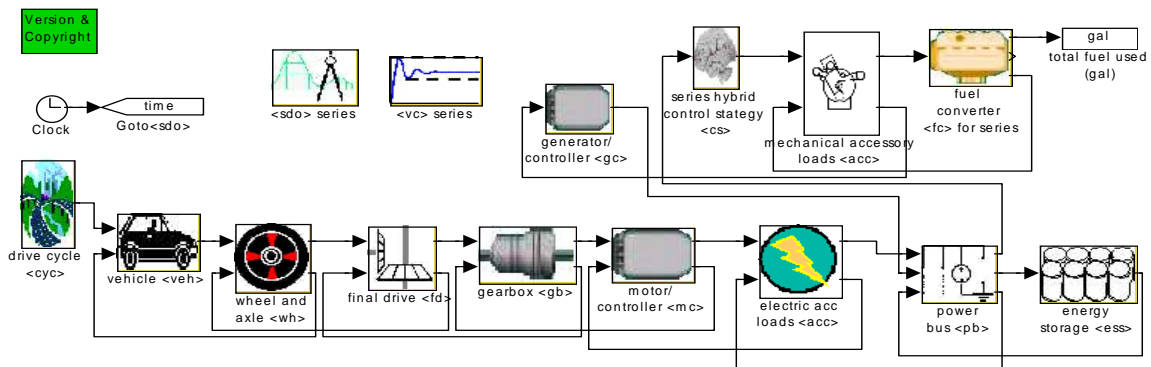


Fig. 7 Basic ADVISOR block diagram for bimodal tram.

배터리의 SOC 계산은 ADVISOR에서 제공하는 적산전류에 의한 SOC 계산방법을 사용하였으며, 전력 분배 알고리즘은 ADVISOR에서 제공하는 직렬형 하이브리드 추진장치의 charge-deplete 방식을 사용하였다. 이 방식은 배터리의 SOC 상한 값과 하한값의 평균값에 배터리 SOC를 유지할 수 있도록 충전하는 방식이다[5]. 일반적으로 하이브리드 차량이 제동시 발생하는 회생전력을 흡수 하기 위해서 배터리의 동작 SOC 범위를 50~70%로 설정한다[7]. 바이모달 트램의 리튬폴리머 배터리 공급사로부터 제안된 SOC 동작 범위는 30~70%이고, 시뮬레이션에서는 배터리 SOC 초기값은 64%로 설정하였으며, 주행 중에는 63~65%를 유지하도록 하였다.

Table 2 Specifications of hybrid propulsion system.

CNG Engine	5.9L, 230HP
generator	permanent magnetic, 150kW
battery	Li-polymer, 80Ah
	nominal voltage 650V
PWM converter	rated power 160kW
electric motor	asyn. induction motor
	45kW, 62kW <sub>peak</sub>
reduction gear	ratio 14.42

기준 주행사이클과 일본의 10-15모드 사이클에 대하여 ADVISOR로 바이모달 트램의 주행을 모의하였다. 그림 8은 Japan 10-15 mode 사이클을 나타낸다. Japan 10-15 Mode 사이클은 ISO 23274에서 제안된 하이브리드 차량에 대한 배출가스 및 연비 측정모드로서, 도심지의 운행을 모의하는 10-mode와 도외지 운행을 모의하는 15-mode 두 가지로 조합되어 있고, 거리는 4.16km/h이고 주행시간은 660초이

다 [6].

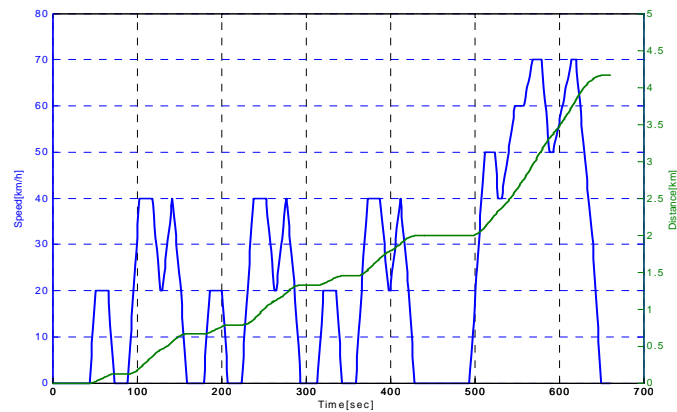
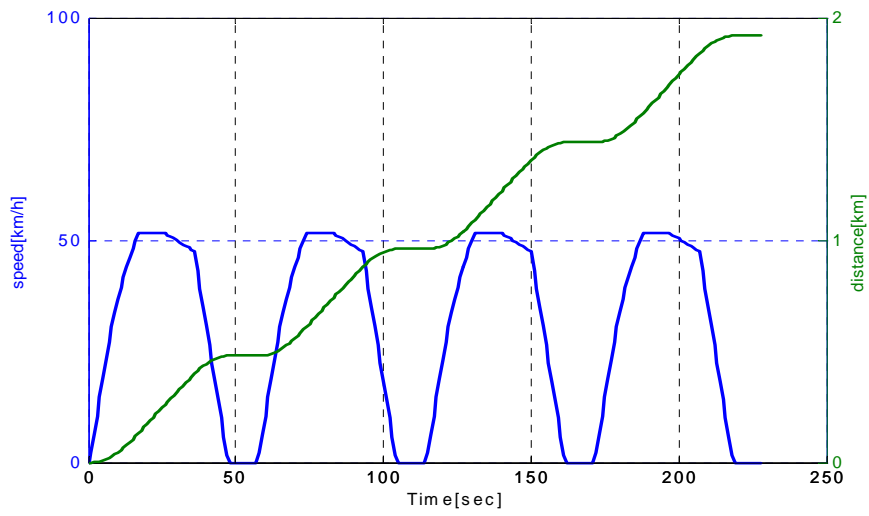
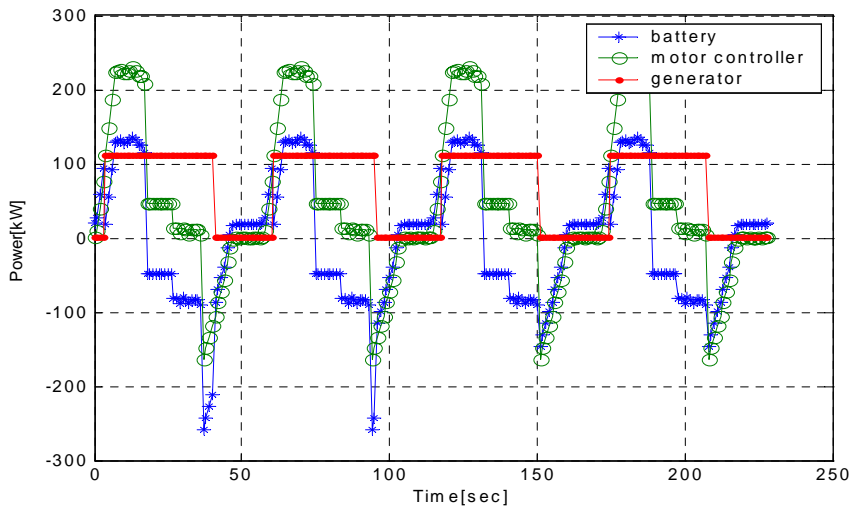


Fig. 8 Japan 10-15 mode drive cycle.

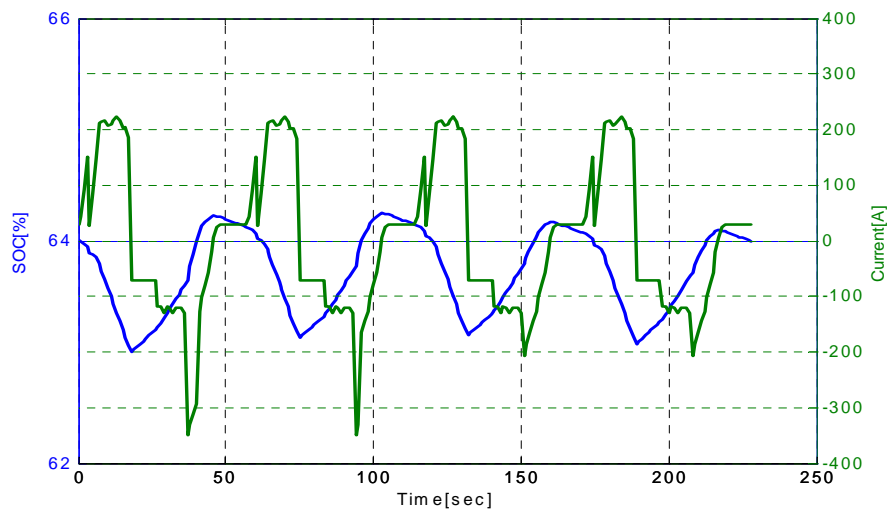
그림 9와 10은 기준 주행사이클과 Japan 10-15 mode로 운행을 모의한 결과를 나타낸다. 바이모달 트램의 속도 및 거리, 요구전력/엔진-발전기출력전력/배터리출력전력, 배터리 SOC(State Of Charge) 및 전류과형을 보여준다. 그림에서 보듯이 리튬폴리머 배터리의 SOC 값이 상한값과 하한값의 평균인 62.5%로 유지되면서 바이모달 트램이 기준속도를 오차없이 추종하고 있다. 초기 가속시에는 배터리 전력만으로 트램이 출발되고 100kW의 견인전력이 요구되는 시점부터는 엔진-발전기 셋과 배터리가 함께 전력을 공급하는 것을 확인할 수 있다. 이 시점부터는 엔진-발전기 셋은 114kW를 공급하고 배터리는 부족분을 보충하는 방식으로 전력분배가 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 기준주행사이클의 경우 배터리 SOC 복귀를 위해 초기 2사이클 동안은 제동시에도 엔진-발전기셋이 동작하며, 이후에는 가속 및 등속시에만 엔진발전기가 동작된다. 기준 주행사이클에 대해서 배터리 충방전 최대 전류값은 충전시 3C와 방전시 4.5C로 나타났으며, 이 값은 리튬폴리머 배터리의 제작사에서 제시한 동작사양을 만족시킨다. Japan 10-15 Mode의 경우에도, 배터리 SOC가 동작영역에서 유지하면서 오차없이 기준속도를 따라 운행되며, 배터리의 충방전 최대전류값은 충전시 3.2C와 방전시 3.4C으로 확인되었다.



(a)



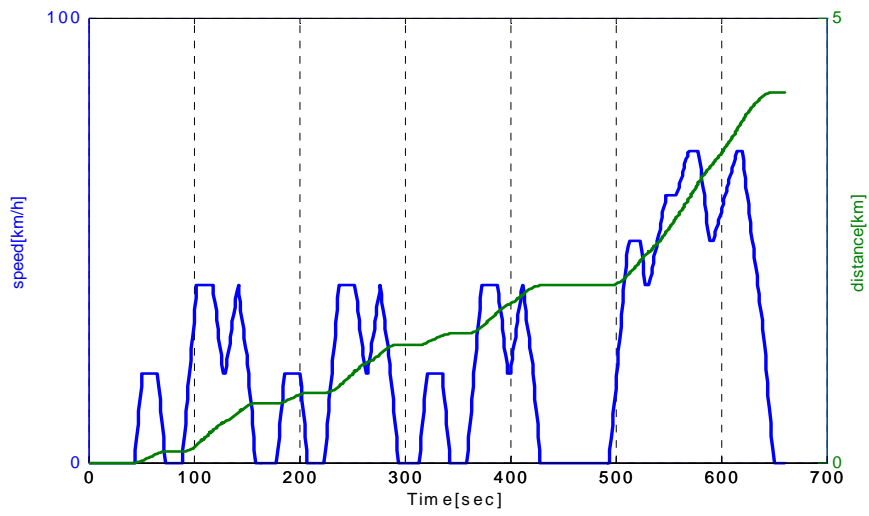
(b)



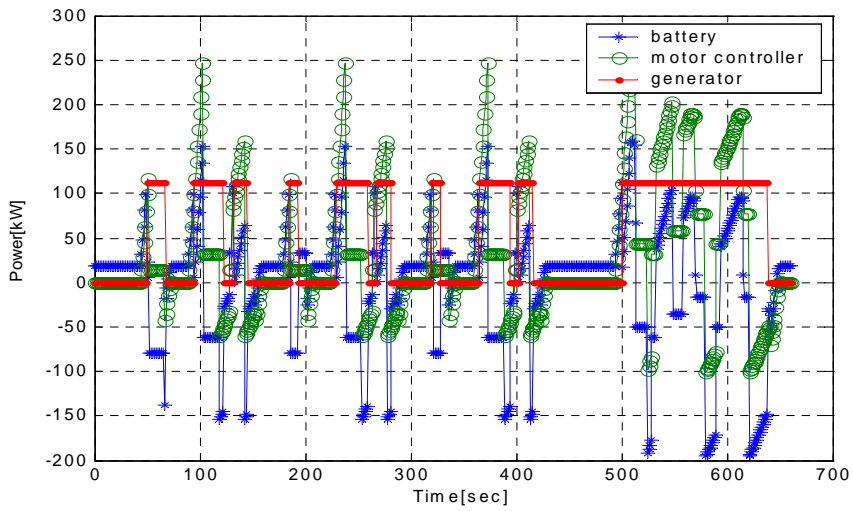
(c)

Fig. 9 (a) speed and distance, (b) power split, (c) battery SOC and current in case of the design cycle.

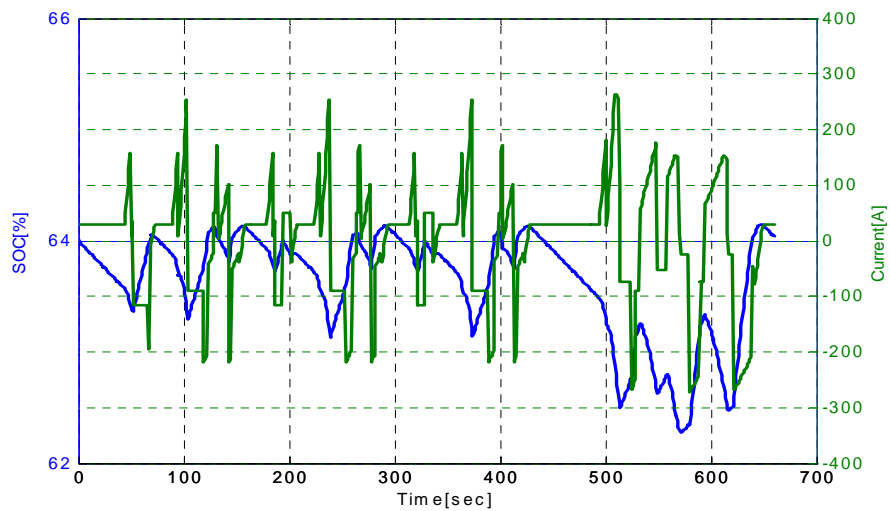




(a)



(b)



(c)

Fig. 10 (a) speed and distance, (b) power split, (c) battery SOC and current in case of Japan 10–15 Mode.

## 5. 결 론

본 논문에서는 바이모달 트램의 동작사양을 기초로 직렬형 하이브리드 추진계의 요구사양을 제시하였으며, 하이브리드 차량용 시뮬레이션 툴을 이용하여 바이모달 트램의 추진계 성능을 검토하였다. 기준주행사이클로부터 추진력 및 제동력을 계산하였으며 바이모달트램의 특성곡선을 작성하였다. 충분한 추진 제동력을 얻을 수 있는 엔진 및 배터리의 용량을 선정하였고, 엔진발전기 셋과 배터리간의 전력 분배방식에 대해 설명하였다. 바이모달 트램 사양을 ADVISOR에 적용하고, 기준주행사이클과 Japan 10-15 Mode에 대하여 바이모달 트램의 운영을 모의하였으며, 엔진발전기 셋과 배터리간의 전력분배 및 배터리 SOC와 배터리 충방전 전류값을 검토하였다.

## 참고문헌

1. 건설교통부, "신에너지 바이모달 저상굴절차량 개발" 4차년도 연차보고서, 2007.
2. John G.W., "Propulsion systems for hybrid electric vehicles", Electrical Machine Design for All-Electric and Hybrid-Electric Vehicles (Ref. No. 1999/196), IEE Colloquium on 1999.
3. Kyuhoon,"Development of a CNG engine for a heavy-duty commercial vehicles", proceeding of 8th next generation vehicle workshop, KATI, 2000.
4. 건설교통부, "간선급행버스체계(BRT) 설계 지침", 2006.
5. The ADVISOR Code and Manual, <http://www.ctts.nrel.gov/analysis>
6. ISO 23274:2007(E), "Hybrid-electric road vehicle-Exhaust emissions and fuel consumption measurements-Non-externally chargeable vehicles", 2007.
7. Donald W. Corson, "High power battery systems for hybrid vehicles", Journal of Power Sources, Vol.105, Iss.2, Pp.110~113, March 2002.