

# 바이모달 트램의 직렬형 하이브리드 추진 전원장치 시험

## Test of the Series Hybrid Propulsion Power Unit of a Bimodal Tram

배창한\* 장세기\*\* 목재균\*\* 이강원\*\* 김용태\*\* 배종민†

Bae, Chang-han Chang, Seky Mok, Jai-kyun Lee, Kwang-won Kim, Yong-tae Bae, Jong-min

### ABSTRACT

A bimodal tram is being developed to combine the flexibility of a bus with the punctuality of a train. The propulsion system is a series hybrid type using a set of CNG engine generator and Li-polymer battery. This paper presents the experimental results of the series hybrid propulsion power unit using an active loader which can simulate powering and regenerative braking conditions of the propulsion equipments continuously. The power sharing scheme between PWM converter and a battery pack has been observed. The measurement results of DC link voltage and SOC(State Of Charge) of battery pack are presented.

### 1. 서 론

철도의 정시성의 운행체계와 버스의 접근성을 결합한 바이모달 형태의 수송시스템 개발이 전세계적으로 이루어지고 있다. 현재 한국철도기술연구원에서는 전기철도시스템의 경험과 기술을 바탕으로 버스의 접근성과 철도의 정시성을 동시에 구현할 수 있는 바이모달 저장골절 트램을 개발하고 있다. 바이모달 트램은 기존의 일반도로와 전용도로를 주행할 수 있는 고무타이어 방식으로 자기적 주행체도를 사용하는 자동운전방식을 채택하며, 직렬형 하이브리드 전기추진시스템, 전차륜조향장치등 최첨단의 차량기술을 트램에 적용한 획기적인 교통수단이다[1]. 바이모달 트램의 추진장치는 압축천연가스(Compressed Natural Gas, CNG) 엔진과 리튬폴리머 배터리를 사용하는 직렬형 하이브리드 전기추진장치타입으로, 병렬형 하이브리드 타입에 비해 짧은 구간에 대해 빈번한 정차가 필요한 도심지 주행에 적합하고, 배출가스가 적은 하이브리드 추진시스템이다[2,3].

본 논문은 직렬형 하이브리드 추진장치의 두 가지 전력공급원인 엔진-발전기셋과 리튬폴리머 배터리의 조합성능 시험 방법과 시험결과를 제시한다. 바이모달 트램의 직렬형 하이브리드 추진전원장치 시험을 위해서, 유도전동기 및 인버터, 발전기, PWM 컨버터, 배터리팩, 능동부하기로 구성된 실험시스템을 구성하였다. 바이모달 트램에 장착될 압축천연가스 엔진 대신하여 유도전동기와 인버터로 발전기를 일정속도로 구동시키고, PWM 컨버터와 배터리팩을 계통연계 능동부하기로 연결시키고 역행과 제동시의 상황을 모의한다. 바이모달 트램이 가속시에는 능동부하기에서 전력계통으로 차량 소비전력을 공급하는 방식으로 소비전력을 모의한다. 바이모달 트램이 감속시에는 계통으로부터 전력으로부터 직류링크단으로 전달하고, 배터리팩에 저장시키는 방식으로 회생전력을 모의한다. 이를 위해 바이모달 트램의 기준주행사이클과 최고속도주행사이클에 대한 부하전력패턴을 계산하고, 이 부하전력패턴을 능동부하기에 입력하

\* 배창한 : 정회원, 한국철도기술연구원, 바이모달수송시스템연구단, 선임연구원  
E-mail : chbae@krti.re.kr

TEL : (031)460-5417 FAX : (031)460-5024

\*\* 정희원, 한국철도기술연구원, 바이모달수송시스템연구단

† (주)한국화이바

고 연속적으로 모의할 수 있도록 한다. 발전기의 교류전력을 안정된 직류전력으로 변환시키는 PWM 컨버터의 출력전력에 제한치를 설정하면서 시험을 실시하고, PWM 컨버터, 배터리팩 및 능동부하기의 입출력 전력, 직류링크단 전압변동 및 배터리팩 SOC 변동량을 측정하며 분석결과를 제시한다.

## 2. 직렬형 하이브리드 추진장치

그림 1은 바이모달 트램의 직렬형 하이브리드 추진장치의 전체 개략도를 나타낸다. 바이모달 트램의 직렬형 추진장치는 CNG 엔진-발전기 셋, PWM 컨버터, 추진인버터 및 모터제어기, 리튬폴리머 배터리팩 및 BMS(Battery Management System), 감속기, 견인전동기, 추진 제어 및 에너지관리를 수행하는 하이브리드 제어기, 차량의 기타 전장품의 구동과 제어전원을 위한 보조전원장치인 DC/AC 컨버터, DC/DC 컨버터로 구성된다.

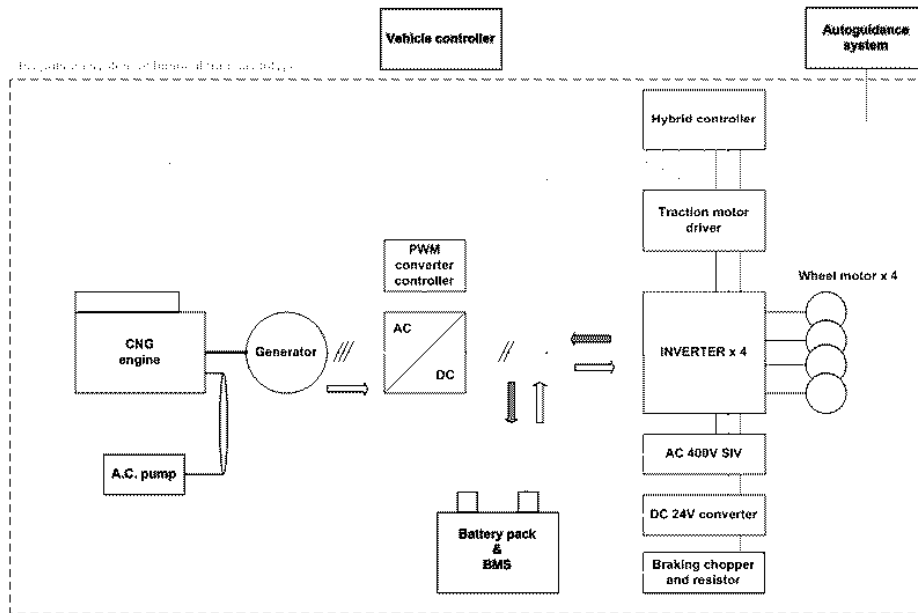


Fig. 1 Scheme of series hybrid propulsion system

하이브리드 제어기는 엔진-발전기 셋과 배터리간의 전력분담을 제어하고, 추진장치 구성품들의 상태 정보를 자동운전장치와 차량제어장치로 전송하는 역할을 수행한다. CNG 엔진은 Euro V 배출가스 기준을 만족시킬 수 있는 Cummins사의 230HP CNG엔진이 사용되며, 최대 출력용량은 172kW@2800rpm이고 최대토크는 678Nm@1600rpm이다. CNG 엔진축에 직결된 발전기는 3상 영구자석형 동기발전기타입으로, 95%의 효율로 최대 150kW의 전력을 생산할 수 있다. PWM 컨버터는 엔진-발전기 셋으로부터 발생된 전력을 차량 부하상황을 고려하여 발전기 출력전력을 제어하고, 직류링크단 전압을 일정하게 유지하며, 안정된 배터리 충전전력을 공급하기 위한 역할을 수행한다. PWM converter는 발전기의 누설인덕턴스를 승압인덕턴스로 활용하고, 안정된 직류전압을 공급한다. 또한 차량 부하상황을 고려하면서, 엔진-발전기 셋의 출력전력을 여러 단계로 제한할 수 있도록 한다. 배터리팩은 80Ah, 52kWh 용량이며, 기존 NiMh(Nickel Metal hydride) 배터리보다 전력 및 에너지 밀도가 높아 중량 및 사이즈를 최소화한다. 배터리팩은 배터리모듈들과 BMS로 구성되고, 80Ah의 리튬폴리머 전지 8셀을 묶어 1개의 모듈로 구성되고 총 22개의 모듈로 이루어진다. 과전압에 민감한 특성을 갖는 리튬폴리머 배터리의 보호와 회생제동시 회생전력으로 인한 직류링크단 전압의 과도한 상승방지를 위해 제동초퍼 및 저항기를 설치된다. 보조전원장치는 20kW SIV(Static Inverter)와 6kW DC/DC 컨버터로 구성되며, 각종 컴프레서와 펌프구동 및 차량제어전원으로 사용된다. 견인전동기는 수냉각 방식의 유도전동기로서 소형·경량화를 위해서 감속기와 일체형으로 제작하였고, 2축과 3축 구동을 위해 4개의 견인전동기가 4개의 추진인버터로 구동된다.

### 3. 실험 시스템 구성

그림2는 능동부하기를 이용한 하이브리드 추진장치의 전원장치실험 시스템을 나타낸다. 엔진대신에 유도전동기를 사용하여 발전기를 구동시키며, 발전된 전력은 PWM 컨버터로 전달되어 안정된 직류전력으로 변환된다. 또한 배터리팩은 PWM 컨버터의 출력단과 능동부하기의 직류입력단에 연결된다. 능동부하기는 수동소자를 사용한 기존 부하장치와 달리, IGBT 스위칭에 의한 전류제어로 부하를 구현하는 전력변환기이다. 소비전력 모의 시에는 입력단 전력을 계통연계변압기를 거쳐 계통단의 보내는 방식으로 동작되고, 회생전력 모의 시에는 그 반대로 동작한다. 소비전력과 회생전력을 연속적으로 구현할 수 있기 때문에, 바이모달 트램의 운행에 따른 부하패턴을 모의가 가능하다.

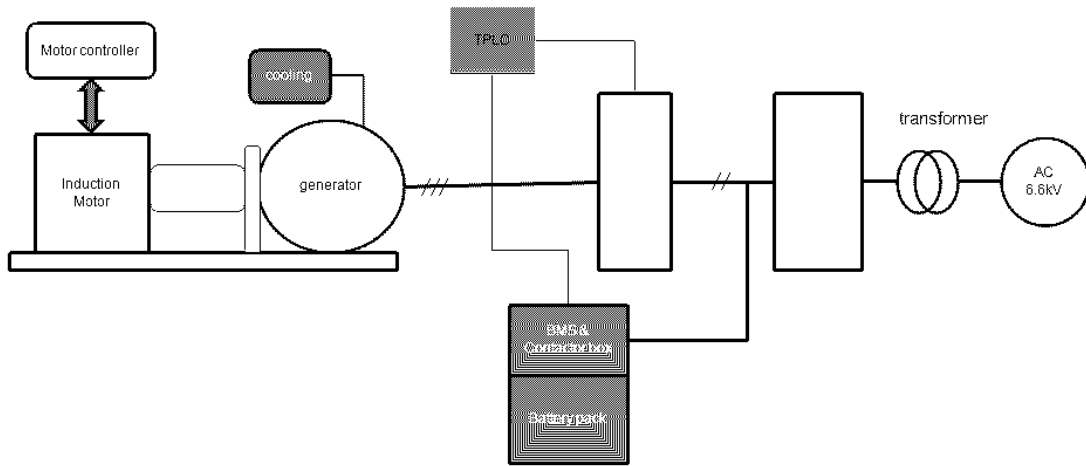


Fig. 2 Scheme of experimental setup.

능동부하기에서 구현될 기준 전력패턴은 식(1)과 (2)로부터 계산된다. 식(1)은 가속시의 전력값이고, 식(2)는 감속시의 전력값이다. 표 1의 바이모달 트램의 설계조건과 기준주행사이클과 최고속도주행사이클의 속도 프로파일을 사용하여 요구전력패턴이 만들어진다.

$$P_{acc} = \left\{ m\alpha v_{acc} + \frac{1}{2} C_d A \rho v_{acc}^3 + 9.8 C_f m v_{acc} + 9.8 m \sin(a) \right\} / \eta_{rg} \eta_m \eta_{inv} \quad (1)$$

$$P_{brk} = \left\{ m\alpha v_{brk} + \frac{1}{2} C_d A \rho v_{brk}^3 + 9.8 C_f m v_{brk} + 9.8 m \sin(a) \right\} \times \eta_{rg} \times \eta_m \times \eta_{inv} \quad (2)$$

여기서  $m$ 은 바이모달 트램의 설계 중량,  $\alpha$ 는 가속도,  $\beta$ 는 감속도,  $v_{acc}$ 는 가속시 차량 주행속도,  $v_{brk}$ 는 감속시 차량 주행속도,  $C_d$ 는 공기저항계수,  $C_f$ 는 주행저항계수,  $\rho$ 는 공기밀도,  $A$ 는 차량의 전면 투영면적,  $a$ 는 주행로 경사도,  $\eta_{rg}$ 는 감속기 효율,  $\eta_m$ 는 견인전동기 효율,  $\eta_{inv}$ 는 추진인버터 효율값이다.

**Table 1.** Vehicle parameters.

Empty weight	17,600 <i>kg</i>
50% loaded weight	21,340 <i>kg</i>
Max. permissible weight	24,950 <i>kg</i> (116 people)
Front area ( <i>A</i> )	8 <i>m</i> <sup>3</sup>
Transmission ratio ( <i>G</i> )	14.42
Aerodynamic drag coefficient ( <i>C<sub>d</sub></i> )	0.6
Rolling resistance coefficient ( <i>C<sub>f</sub></i> )	0.01
Tire radius ( <i>r</i> )	1.042 <i>m</i>
Air density ( <i>ρ</i> )	1.202 <i>kg/m</i> <sup>2</sup>
Max. acceleration ( 0 → 25 <i>km/h</i> )	1.2 <i>m/s</i> <sup>2</sup>
Max. deceleration ( 38 <i>km/h</i> → 0)	1.2 <i>m/s</i> <sup>2</sup>
Max. gradient	9%

그림 3은 바이모달 트램의 기준주행사이클 및 최고속도주행사이클의 속도패턴과 부하전력패턴을 나타낸다. 기준주행사이클은 all-out형태로 주행시 평균속도가 30km/h이상을 유지하는 것을 목표로 선정되었다. 기준 주행사이클의 평균속도는 30.9km/h, 최고속도는 53.4km/h, 주행거리는 500m, 주행시간은 58초이다. 최고속도주행사이클은 바이모달 트램의 최고운행속도인 80km/h까지 주행하며, 주행거리는1.08km, 주행시간은 86초이다.

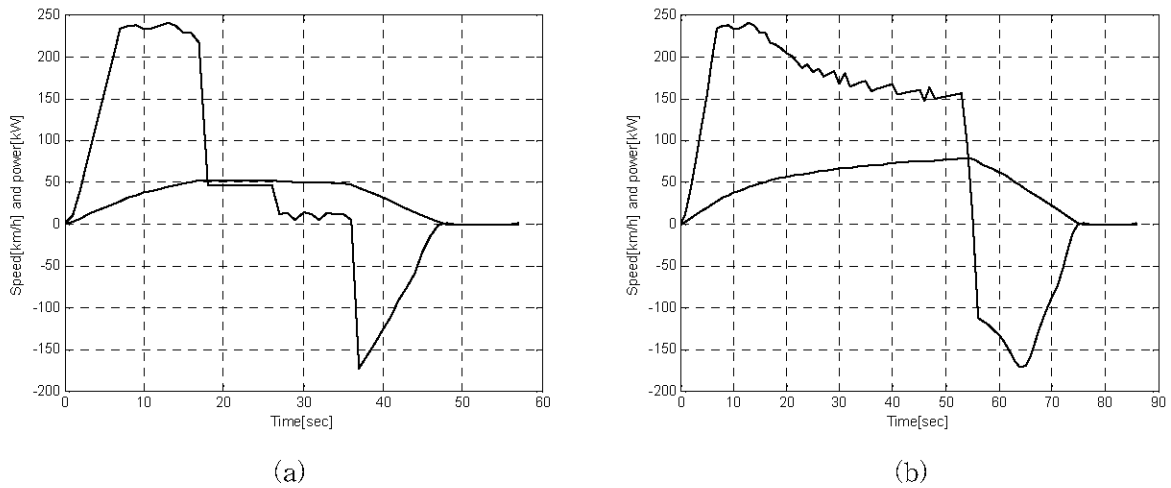


Fig.3 Load power pattern and tram speed (a) designed driving cycle, (b) maximum driving cycle.

그림 4는 구성된 실험 시스템 사진을 나타내며, 표 2는 실험시스템의 사양을 나타낸다.



Fig.4 Photograph of experimental setup.

**Table 1.** Experimental setup

Generator	type : permanent magnetic, power rating : 150kW output AC voltage : 350 - 440Vrms, 3ph
PWM converter	power rating : 160kW output DC voltage : 650V switching frequency : 6.6kHz
Battery pack	Li-polymer, 80Ah nominal voltage 650V
Active loader	power rating : 200kW output AC voltage : 380Vrms 3ph

#### 4. 실험결과

그림 5는 능동부하기에서 구현될 기준주행사이클 및 최고속도주행사이클에 대한 부하전력패턴을 보여 준다. 그림에서 보듯이 능동부하기의 용량이 바이모달 트램의 부하전력패턴을 구현하기에는 부족하여, 75%로 축소시켜 실험하였다. PWM 컨버터의 출력전력을 몇 가지 단계로 제한시키고, 기준주행사이클과 최고속도 사이클을 각각 5회 주행하는 방식으로 실험하였다.

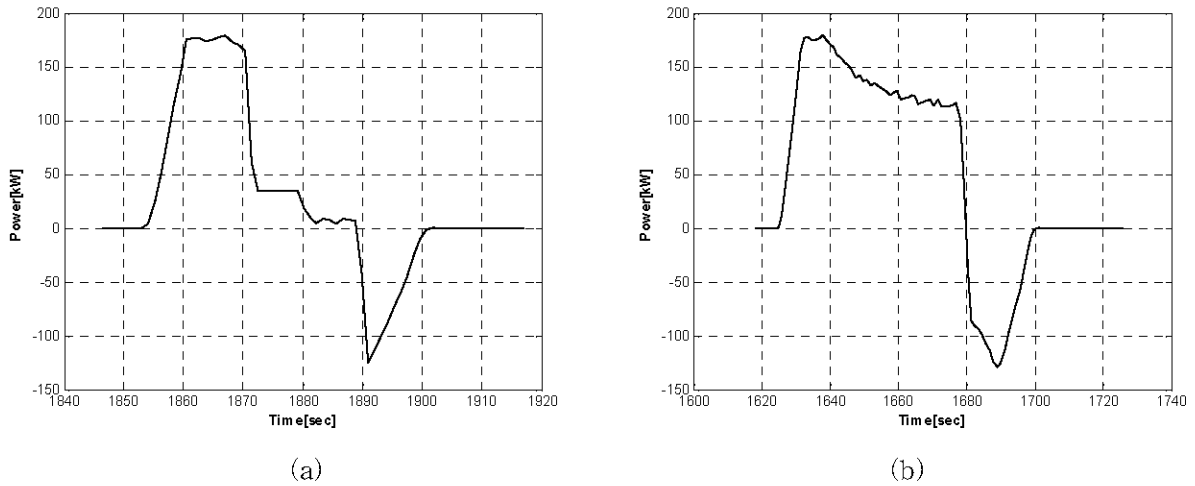


Fig. 5 load power pattern of active loader (a) for designed driving cycle (b) for maximum speed driving cycle.

엔진을 대신해 유도전동기로 발전기를 1600rpm으로 일정하게 회전시키고, PWM 컨버터의 출력 전력 제한치를 여러 단계로 설정하며 실험하였다. 능동부하기는 미리 입력된 기준주행사이클 및 최고속도사이클에 대한 부하전력패턴을 연속적으로 5사이클씩 모의하였다. 가속시에는 전체 소비 전력을 PWM converter와 Battery가 공동 부담하며 동작하고, 감속시에는 PWM Converter의 동작은 멈추고 견인전동기로부터 발생된 회생에너지가 battery에 충전되도록 하는 연동 시험을 실시하였다.

그림 6-8은 기준주행사이클에 대한 실험결과파형을 나타낸다. 그림 6은 PWM 컨버터의 출력전력, 그림 7은 배터리팩의 출력전력, 그림 8은 직류링크단의 직류전압파형을 나타낸다. 그림 6과 7에서 보듯이 바이모달 트램 가속시 요구되는 전력에 대해서, PWM 컨버터는 출력전력 제한치 만큼의 전력을 능동부하기로 공급하고, 나머지 부족분은 배터리가 공급한다. 그림 7과 8에서 보듯이, PWM 컨버터의 출력전력 제한치가 커짐에 따라, 배터리가 담당하는 전력크기는 작아지고 따라서 직류링크단 전압의 감소폭도 작아진다.

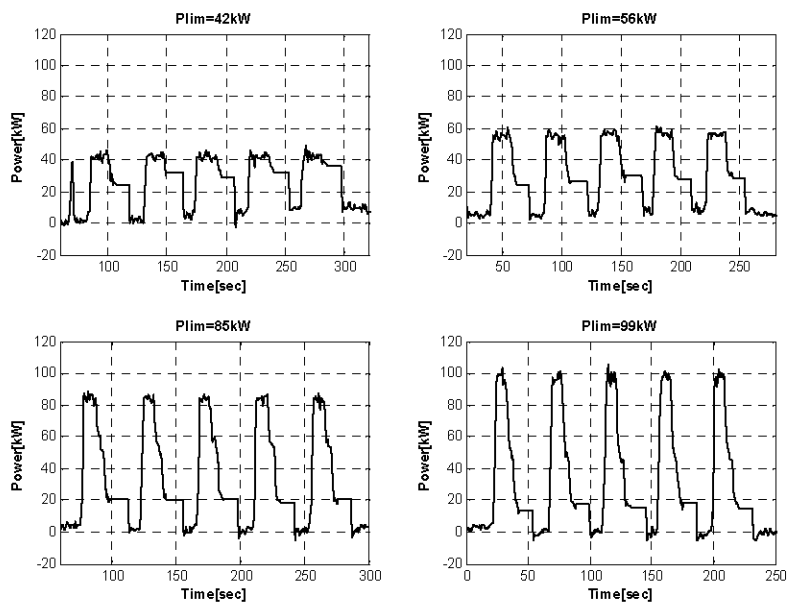


Fig. 6 Output power waveforms of the PWM converter output power at designed driving cycle

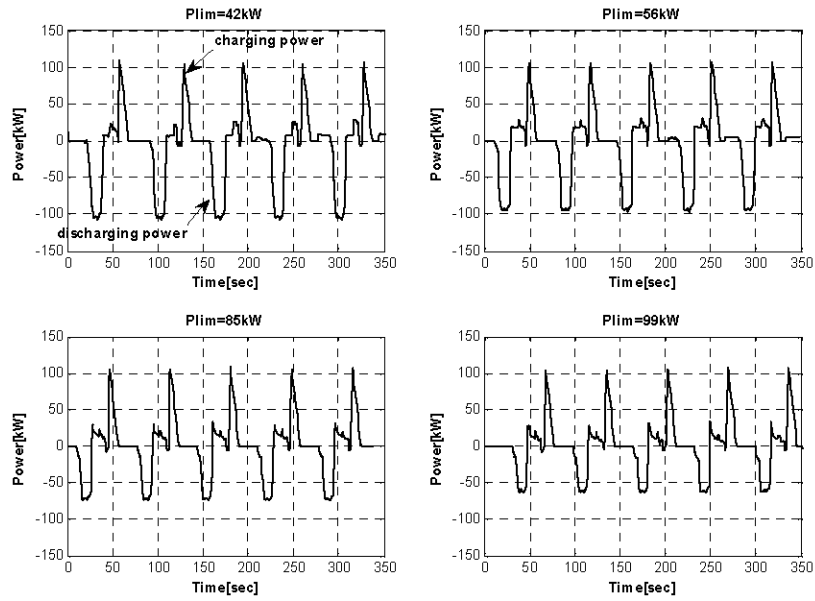


Fig. 7 Output power waveforms of the battery pack at designed driving cycle.

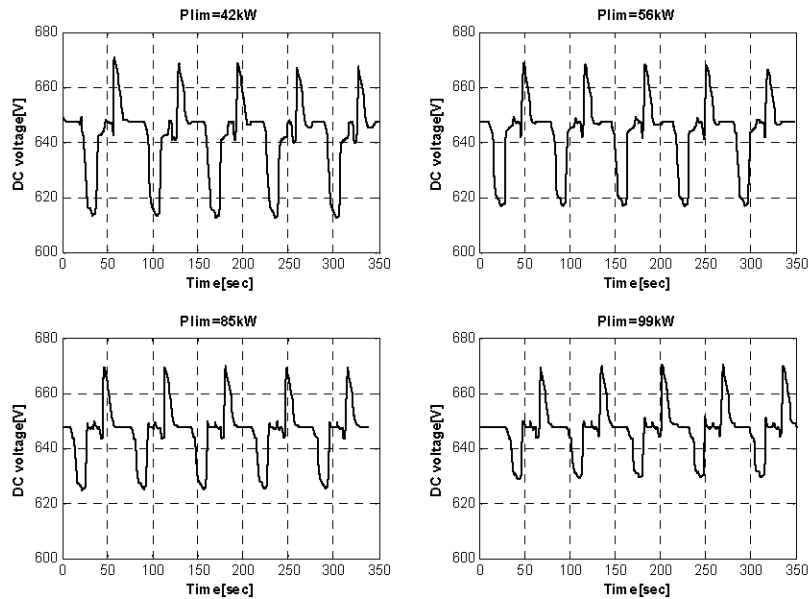


Fig. 8 Intermediate DC voltage waveforms at designed driving cycle.

그림 9와 10은 최고속도 주행사이클에 대한 직류링크단 전압 및 전류, 배터리 팩 SOC, 배터리 셀의 평균온도를 보여준다. 그림 9는 PWM 컨버터의 전력제한치를 40kW로 한 경우이고, 그림 10은 전력 제한치를 140kW로 설정한 경우이다. 그림 9와 10을 비교하면, 그림 10의 경우 차량 가속에 필요한 전력이 PWM 컨버터에서 140kW까지 공급되므로 배터리팩에서는 약 50kW의 전력 만을 공급하고 따라서, 방전 전력이 소비전력보다 크므로 SOC 값은 점점 증가되고, 직류링크단 전압강하도 작아진다.

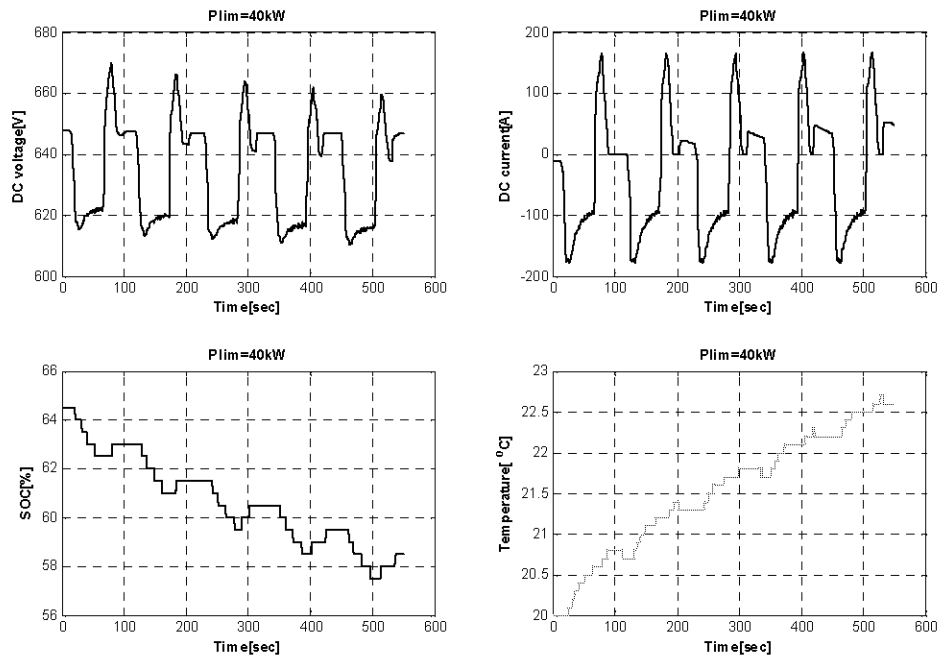


Fig. 9 Battery voltage, current, SOC and temperature waveforms in case of maximum driving cycle at Plim=40kW

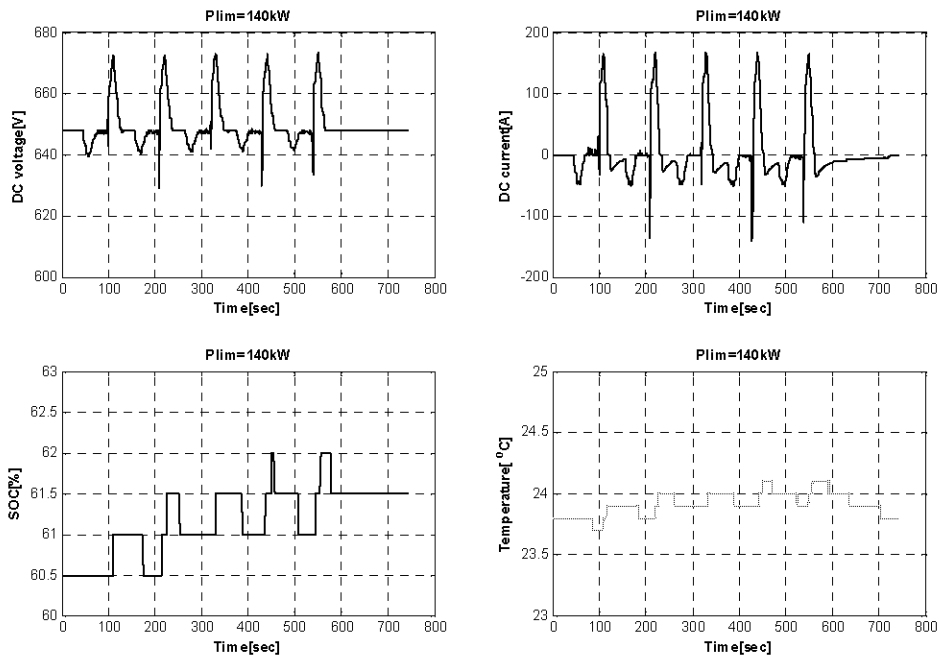


Fig. 10 Battery voltage, current, SOC and temperature waveforms in case of maximum driving cycle at Plim=140kW

그림 11은 PWM 컨버터 전력제한 값에 따른 배터리 SOC 변동폭을 나타낸다. 최대속도주행사이클의 경우 PWM 컨버터의 전력제한치가 커짐에 따라 배터리 팩의 소비전력이 줄어들기 때문에 SOC 변동폭의 값은 작아진다. 특히 PWM 컨버터의 출력전력제한 값이 100kW보다 큰 경우, SOC 변동폭은 음수 값이 되며, 이것은 회생제동으로 인한 회생전력이 소비전력량 보다 커져 배터리 SOC 값이 초기값보다 상



승한 것을 의미한다. 기준주행사이클의 경우도 최고속도 주행사이클의 경우와 마찬가지로 SOC 변동폭이 PWM 컨버터 출력전력 제한값이 커짐에 따라 작아지며, 단지 최고속도 주행사이클의 경우 보다는 차량가속 시 필요한 소비전력량이 작기 때문에 보다 완만한 곡선으로 나타난다. 그림 12는 PWM 컨버터 전력제한 값에 따른 배터리팩의 전압변동폭의 변화를 보여준다. 기준주행사이클과 최고속도 주행사이클 모두 PWM 컨버터의 전력분담이 커짐에 따라 배터리 팩의 출력전력이 감소하고 따라서 배터리팩 전압의 변동폭도 감소한다.

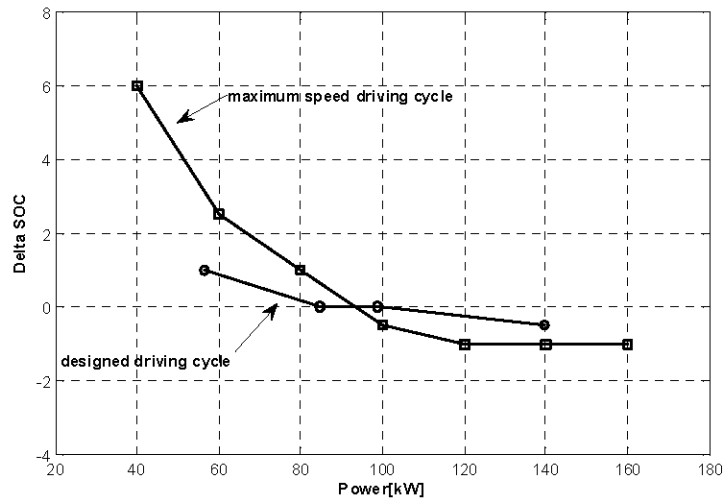


Fig. 11 The SOC variation of battery pack.

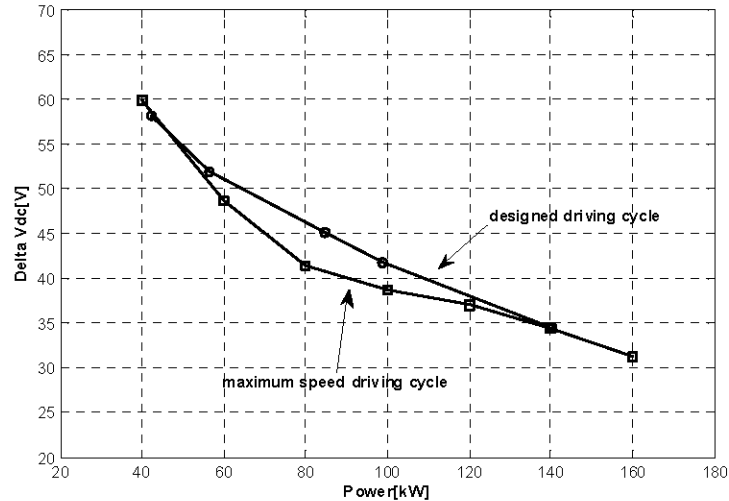


Fig. 12 The DC voltage variation of battery pack.

## 5. 결론.

본 논문은 능동부하기를 사용하여 바이모달 트램 직렬형 하이브리드 추진용 전원장치에 대한 실험결과를 제시하였다. 바이모달 트램이 기준주행사이클과 최고속도주행사이클로 주행시 직렬형 하이브리드 추진장치의 부하전력패턴을 계산하고, 이들 부하전력패턴을 역행전력과 회생전력을 연속적으로 모의할 수 있는 능동부하기에 입력시켰다. 유도전동기, 발전기, PWM 컨버터, 배터리팩, 능동부하기를 사용하여 바이모달 트램 추진장치의 전원장치 실험 시스템을 구성하였다. 발전기의 교류전력을 직류전력으로 변환시키는 PWM 컨버터와 배터리팩간의 부하분배는 PWM 컨버터의 출력전력을 몇가지 단계로 제한시키는 방식으로 모의하였으며, 이때, 직류링크단 전압의 변동폭과 배터리의 SOC 변동폭을 분석하였다.

### 참조문헌

1. 건설교통부, "신에너지 바이모달 저장굴절차량 개발" 5차년도 연차보고서, 2008.
2. Caratozzolo P, Canseco, M, "A proposal for the propulsion system of a series hybrid electric vehicle," Power Electronics Specialist Conference IEEE 34th Annual, Vol.2, Iss 15-19, pp.586-591, 2003.
3. Barsali S, Miulli C, Posseniti A, "A control strategy to minimize fuel consumption of series hybrid electric vehicles", Energy conversion IEEE Trans. on, Vol.19, Iss.1, Pp.187-195, 2004.

### 인사말

본 연구는 국토해양부의 교통체계효율화사업의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.