

## 경전철용 연료전지 하이브리드 동력시스템 설계 및 제어

### Design and Control Strategy of Fuel Cell Hybrid Power System for Light Electric Railway Vehicles

김영렬<sup>†</sup> · 박영원\*

Young-Ryul Kim · Young-Won Park

**Abstract** The development of fuel cell hybrid power system, as a next generation power system to promote clean energy which will mitigate the continued global warming, has demonstrated a significant progress in passenger vehicle applications. Also, in case of railway vehicles in non-electrified railway lines, the adoption of fuel cell hybrid power system is being studied among well-known manufacturers. This paper introduces both the configuration and the control strategy of fuel cell hybrid power system to apply to a light electric railway vehicle having a repeated driving pattern of acceleration, coasting and deceleration. The simulation results demonstrate the viability of the proposed power system design and its control strategy.

**Keywords** : Light electric railway vehicle, Fuel cell, hybrid power system, Control strategy, Matlab/Simulink

요 지 지구 온난화를 경감 하기 위한 차세대 동력시스템으로서 연료전지 동력시스템은 승용차를 중심으로 활발하게 개발되고 있다. 가선이 설치되어 있지 않은 철로에서의 철도차량의 경우에 있어서도 연료전지 동력시스템의 적용이 선진 각국을 중심으로 연구개발 되고 있다. 본 논문에서는 가속, 타행주행 및 감속을 반복하여 주행하는 경전철에 대하여 연료전지 하이브리드 동력시스템을 적용하고자 할 때 이에 대한 설계 및 제어전략을 논하였고, Matlab/Simulink로 모델링하여 시뮬레이션을 수행하였다.

주 요 어 : 경전철, 연료전지 하이브리드 동력시스템, 제어전략, 매트랩/시뮬링크

## 1. 서 론

지구온난화는 현실이며 21세기는 지구환경과 에너지문제를 해결해야 할 역사적 사명에 놓여 있다. 이에 따라 환경기술력이 국가와 기업 경쟁력의 원천임을 직시하여 전 세계적으로 에너지 저장기술 및 대체에너지기술이 각국 정부의 주도하에 개발되고 있다. 특히, 태양광 및 풍력을 이용하여 만들어진 전기로부터 물을 전기 분해하여 수소를 제조하고 수소를 연료로 하는 수소에너지 사회가 필연적이라고 할 수 있다. 수소연료를 가장 효율적으로 이용하는 것은 연료전지이고, 연료전지의 파급효과가 가장 큰 것이 차량 분야이다. 수소를 연료로 하고 연료전지로부터 생성된

전기를 전기구동 모터에 공급하여 차량을 구동하는 연료전지 차량은 완전 무공해 차량이며 연료 효율 또한 기존 내연기관 차량의 3배를 목표로 하고 있다[1]. 철도차량에서도 선진메이커를 중심으로 연료전지 하이브리드 철도차량 개발이 착수되고 있는데 특히, 역(Station)간 거리가 짧으며, 가속, 타행주행(Coasting) 및 감속 그리고 정차를 반복하여 운행하는 특징을 갖는 경전철에 대해 시험 차량 개발을 통한 성능 및 동력제어 알고리즘 검증에 대한 선행연구가 이루어지고 있다[2]. 그러나 동력시스템의 주요 구성품인 연료전지 및 배터리의 용량과 같은 설계 사양 결정에 대한 배경 및 타당성에 대해서는 언급되어 있지 않으며, 동력제어에 대해서도 근거를 제시하고 있지 못하고 있다. 본 논문에서는 경전철에 연료전지 하이브리드 동력시스템 적용을 위한 동력시스템 설계 및 동력제어 전략을 개발하고 시뮬레이션을 통해 검증하고자 한다.

<sup>†</sup> 책임저자 : 정희원, 아주대학교, 시스템공학과  
E-mail : yrk\_1234@naver.com  
TEL : (031)400-4736 FAX : (031)400-1234

\* 정희원, 아주대학교, 시스템공학과, 교수

## 2. 연료전지 하이브리드 동력시스템의 구성

### 2.1 동력시스템 구성

Fig. 1은 경전철에 적용을 제안하고 있는 연료전지 하이브리드 동력시스템의 물리적 구성과 전력흐름을 나타낸 것으로서 승용차에 적용 되고 있는 구성과 유사하다[5-7]. 본 시스템은 구동모터의 인버터측 DC Link 전압이 연료전지의 전압에 따라 가변되는 구조이다. 배터리는 양방향 DC/DC 컨버터를 통하여 구동모터의 회생전력 및 연료전지의 발전 전력을 저장할 수 있으며 반대로 구동모터에 전력을 공급할 수 있다. 차량에서 요구되는 부하는 구동모터 뿐 아니라 냉난방장치와 같은 보기류 부하 및 연료전지의 발전에 필요한 연료전지 운전장치류의 부하와 같은 연료전지 기생전력을 포함 한다. 이들은 각각 운전 전압이 다르기 때문에 Fig. 1과 같이 해당 전원에 분산 배치된다.

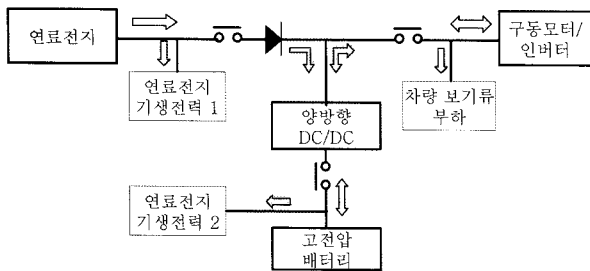


Fig. 1. Power flow and configuration of power system for hybrid fuel cell vehicle

### 2.2 제어 시스템 구성

동력시스템을 제어하기 위한 제어시스템의 구성과 각 제어기의 동작에 관한 주요 입출력 사양은 Fig. 2와 같다[2].

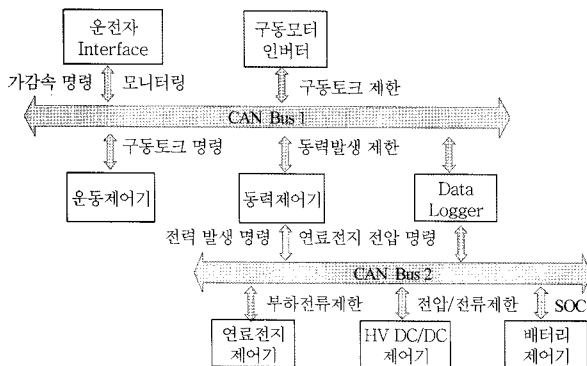


Fig. 2. Configuration of hybrid fuel cell system total control

제어시스템은 운동제어기와 동력제어기 각각에 CAN Bus 1과 2를 두어 각각은 구동모터의 토크제어 및 연료전지의 발전제어를 수행한다. 즉, 운동제어기는 운전자와의

인터페이스 및 구동모터/인버터의 상위제어기가 되며, 동력제어기는 연료전지제어기, DC/DC컨버터제어기 및 배터리제어기의 상위제어기가 된다. 또한 운동제어기와 동력제어기는 상호 협조적 제어를 수행하기위해 동력제어기는 CAN Bus1에도 접속하고 있다. Data Logger 역시 각 CAN Bus에 접속하여 각 제어기들의 주요 연산 결과 파라메타 값 및 입/출력 값을 저장한다.

### 2.3 연료전지 하이브리드 동력제어의 개념

연료전지 하이브리드 동력시스템의 기본적인 동력제어 개념은 연료전지 및 배터리의 성능 선도 및 이들 시스템의 보호를 고려하고 있다.

#### 2.3.1 연료전지 성능곡선

Fig. 3은 연료전지 성능 곡선도를 나타내고 있다. 즉, 연료전지에 부하전류가 없을 때(OCV: Open Circuit Voltage) 단위 셀 전압은 약 1.0V가 되며 부하전류가 증가되어 단위 셀 전압이 0.6V 이하가 되면 연료전지의 보호를 위하여 부하전류를 증가시키지 않아야 한다.

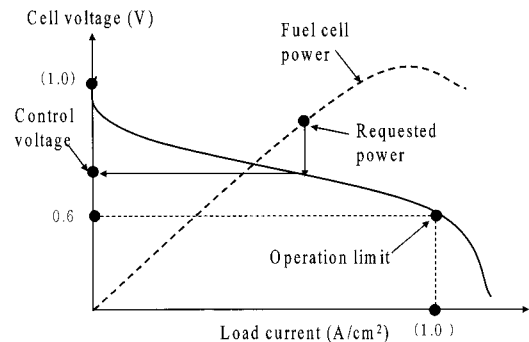


Fig. 3. Performance curve of fuel cell

#### 2.3.2 배터리의 성능곡선과 목표 SOC

Fig. 4와 같이 배터리의 SOC(State of Charge)별 충방전 저항은 SOC가 높을 때는 충전저항이 크고, SOC가 낮을 때에는 방전 저항이 크다. 또한, 배터리의 안전을 위해서 보통 SOC 80%를 상한치로 설정하고 있으며, 내구성을 위하여 30%를 하한치로 설정하고 있다. 배터리의 충방전 효율을 고려하고 상한치 및 하한치 내에서 배터리를 운용하기 위해서 배터리를 목표하는 SOC로 유지 제어가 필요하며 이는 통상적으로 50에서 60% 사이에서 목표 SOC를 결정한다[8,9].

#### 2.3.3 동력제어 알고리즘

하이브리드시스템의 동력 제어의 목적은 구동모터등에

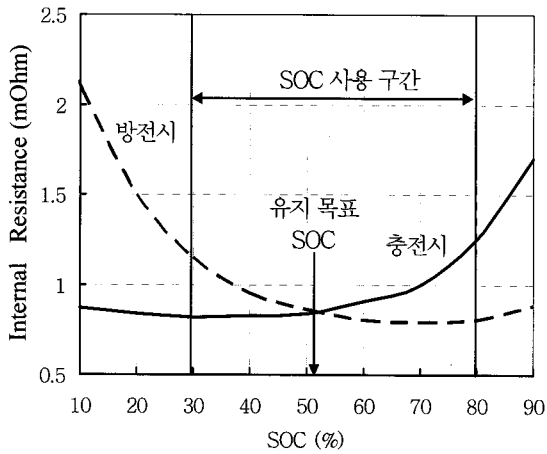


Fig. 4. Internal Resistance of battery

서 소모되고 있는 차량의 부하전력을 충분히 공급하면서 배터리 SOC를 목표하는 값에서 유지하는 것이라 할 수 있다[8,9]. Fig. 5는 연료전지 하이브리드 동력시스템의 동력 제어 개념도로 연료전지 출력 지령값 ( $P_{fc}^*$ )은 구동모터에서의 차량 요구동력과 배터리의 목표 SOC를 추종하는 것으로 결정 된다[8,10].

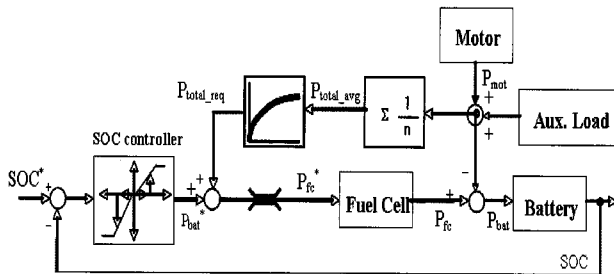


Fig. 5. Power control algorithm of fuel cell hybrid power system

### 3. 경전철의 운행 패턴 및 구동모터 특징

고려하고 있는 연료전지 하이브리드 동력시스템의 적용 대상은 경전철로서 역(Station)간 거리가 짧고 가속, 타행주행(Coasting) 및 감속 과 정차를 반복하는 주행 패턴을 갖는다. 따라서 이러한 주행 패턴에 부합하는 동력시스템설계 및 동력제어 전략이 필요하다.

#### 3.1 운행 패턴과 요구 동력시스템의 특성 예측

Fig. 6과 Table 1은 고려되고 있는 경전철에 요구되는 운행 패턴이다. 도로를 주행하는 차량에서는 노면상태, 도로 상황 및 신호등에 의해 차량의 가속과 감속을 예측할 수 없지만 철도차량은 차량 운행사가 미리 정해 놓은 주행 패턴에 따라 모든 운전자는 거의 같은 패턴으로 운전하게 된다[3].

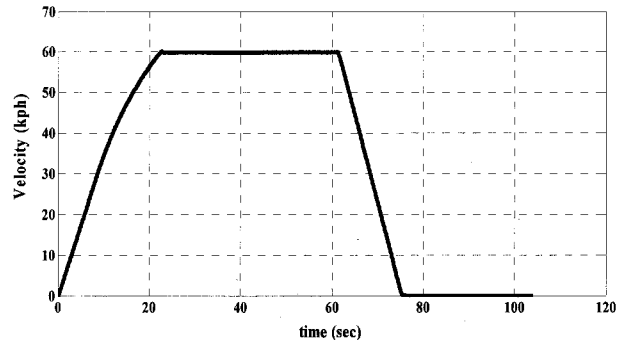


Fig. 6. Driving mode of light electric railway vehicle

Table 1. Operational parameters for the light electric railway vehicle

역간 주행거리	1.0 km
최대속도	60 kph
주행시간	75 sec
정차시간	30 sec

운행패턴에 따른 동력시스템의 설계 및 제어관점에서 주목해야 할 것은 감속에 요구되는 시간이 가속에 요구되는 시간의 절반 수준으로 짧다는 점이다. 이를 위해서는 구동모터를 가속시보다 감속시에 더 큰 전력(Power)을 발생시키도록 운전되어야 할 뿐 아니라 이때 발생하는 회생에너지를 충분히 흡수할 수 있는 배터리 선정이 필요함을 알 수 있다.

#### 3.2 전기 구동 모터의 성능 곡선 과 배터리의 파워 용량

경전철의 운행패턴을 만족하기위해 설계된 전기구동모터의 속도-구동력선도는 다음 Fig. 7과 같다.

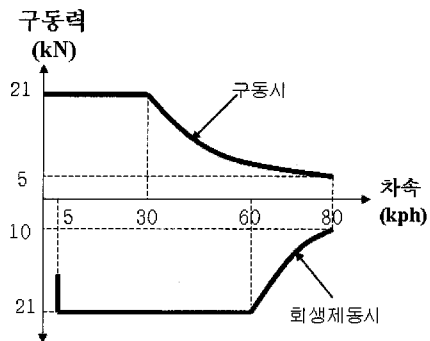


Fig. 7. Driving force of electric motor

즉, 주행패턴에서 요구한 가속시 보다 더 짧은 감속시간에 따라 모터 회생시 제동력은 모터링시의 약 2배 속도 지점에서 최대 제동력을 발생하도록 설계되었음을 알 수 있다.

#### 4. 경전철용 동력시스템 설계 및 제어 전략

##### 4.1 동력시스템 설계

도로를 주행하는 차량에서의 동력시스템 설계는 연료전지의 출력만으로도 차량의 요구출력을 대응 할 수 있도록 하고 배터리의 출력은 제동시에 기계적 제동과의 회생에너지 조합에 의해 설계되는 것이 일반적이다. 그러나, 경전철에서는 정해진 주행 패턴이 있으며 제동시간이 매우 짧고 배터리로의 회생에너지의 비중이 큰 특징이 있으므로 이에 부합하는 새로운 설계기법이 요구되고 있다. 본 논문에서는 경전철의 주행 패턴을 만족하면서 동력시스템의 설계 용량을 최소화 할 수 있는 설계를 다음과 같이 에너지 관점에서 제안하며 이에 대한 설계 예를 다음의 5.3과 5.4에 기술하였다.

Fig. 8은 연료전지 하이브리드 차량에 있어서의 동력흐름을 나타낸다.

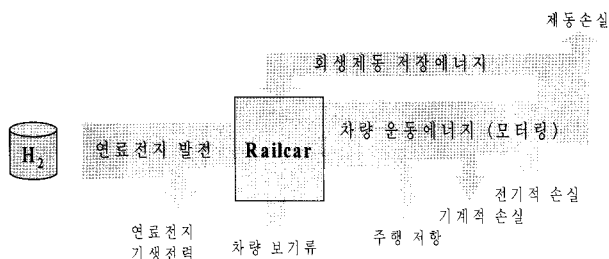


Fig. 8. Energy flow of vehicle and power system

총 주행에너지는 모터링, 차량 보기류, 주행저항, 기생전력 및 기계적/전기적 손실에너지를 포함하는 에너지이며, 연료전지의 공급에너지는 총 주행에너지에서 배터리로 회생된 에너지를 제외한 값이라 할 수 있다. 따라서, 연료전지 최소 출력 용량은 연료전지 공급에너지를 총 주행시간에서 모터의 회생제동 시간을 제외한 시간으로 나눈 값이 된다. 배터리의 출력 용량은 연료전지 용량 결정에 따라 주행 패턴의 가감속을 만족하는 최소용량으로 설계 할 수 있다.

##### 4.2 동력시스템 제어 전략

Fig. 5에서 제시한 연료전지 하이브리드 시스템의 기본적인 동력제어 개념을 바탕으로 본 논문에서는 경전철의 주행 패턴에 부합하는 알고리즘으로서 다음을 제안한다.

- 1) 주행 모드별로 차량의 총 요구 동력에 대해 연료전지 및 배터리의 동력을 분배한다. 주행모드는 다음의 4개의 경우로 분류하며 배터리 SOC에 따라 다시 각각을 세부 분류한다.

- 차량 경부하시 : 연료전지 최대출력 > 차량 총 요구 출력
  - 차량 중부하시 : 연료전지 최대출력 < 차량 총 요구 출력
  - 차량 제동시
  - 차량 정차시
- 2) 차량 30초간 정차시에도 배터리의 SOC에 따라 충전이 필요하면 연료전지를 최대출력으로 운전할 수 있다.
  - 3) 차량 제동시 연료전지도 내구성 및 연료전지에 직접 부하 연결된 연료전지 기생전력을 위해 일정 출력을 발생시킨다.
  - 4) 배터리 SOC가 목표 SOC와의 차가 5% 미만일 때는 연료전지만의 출력을 이용하되 차량 중부하시 및 회생 제동시에는 이에 관계없이 배터리를 충방전 한다.

#### 5. 시뮬레이터 개발 및 시뮬레이션

##### 5.1 시뮬레이터 개발

제안된 연료전지 하이브리드 동력시스템의 설계 및 동력제어 알고리즘을 검증하기 위해 성능해석 시뮬레이터가 필요하다. 이를 위해 Fig. 9와 같이 Matlab/Simulink 기반으로 차량, 운전자, 동력시스템 및 동력제어기를 모델링하여 구성한 시뮬레이터를 개발하였다.

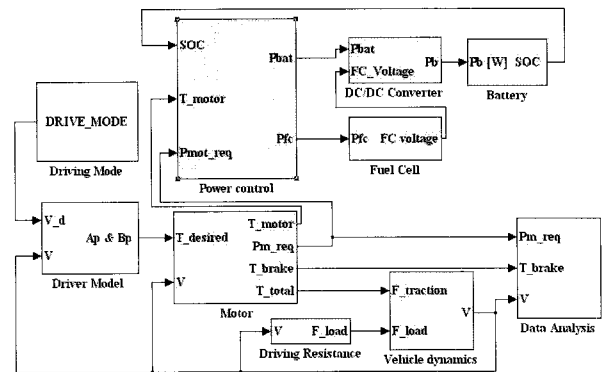


Fig. 9. Simulator based on Matlab/Simulink

##### 5.2 시뮬레이션 대상

시뮬레이션에 사용된 차량 및 동력시스템의 주요 사양은 Table 2와 같다. 여기서, 배터리의 최대 출력은 Fig. 7의 구동모터의 최대 회생전력을 흡수할 수 있는 용량이다.

Table 2. Specification of vehicle parameters

차량 중량	40 ton
차량보기류 부하	50 kW
배터리 기준전압	370 V
배터리 최대출력	350 kW
연료전지 기생전력	26.5 kW

### 5.3 연료전지 출력 결정

차량 주행 모드에 따른 필요한 총 누적에너지 및 감속 구간에서 모터에 의한 배터리의 회생에너지를 구한 시뮬레이션 결과는 Fig. 10과 같다. 이로부터 연료전지 최소 출력은 4.1에서 언급된 것과 같이 계산될 수 있으며 Table 3은 시뮬레이션 및 계산 결과이다. 본 계산 결과에 따라 연료전지의 출력용량을 200kW로 결정하였다.

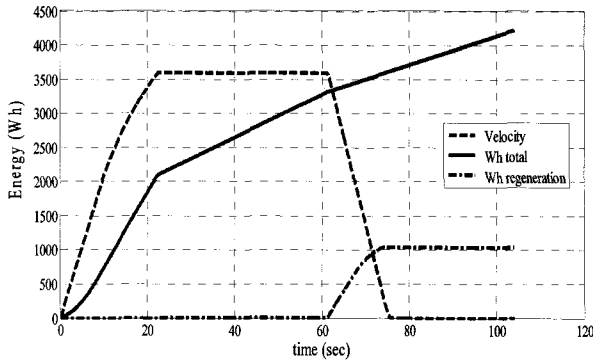


Fig. 10. Consumed energy and regenerating energy of vehicle

Table 3. Simulation result for minimum power of fuel cell

총 주행에너지	4.22 kWh
배터리 회생에너지	1.05 kWh
연료전지 공급에너지	3.17 kWh
연료전지 최소 출력 용량	190 kW

### 5.4 배터리 용량 결정

배터리의 용량(Ah)을 결정하기 위하여 배터리 초기 SOC를 0.4로 두고 배터리의 용량별 주행 시뮬레이션 하여 가속 구간으로 인한 배터리의 SOC의 저하된 값을 비교하였다.

Table 4. Min. SOC of battery in accelerating .vs. battery capacity (Initial SOC of battery = 0.4)

30 Ah	40 Ah	50 Ah	60 Ah	70 Ah
0.25	0.28	0.31	0.32	0.33

Table 4의 결과 30 및 40Ah의 경우 배터리 SOC 허용 한치 0.3 보다 저하되므로 용량으로는 부족하며, 요구 최대 출력을 만족시키기 어려운 용량이라고 할 수 있다. 따라서, 배터리의 용량을 50Ah 이상으로 설정하는 것이 필요하다

### 5.5 동력 제어 알고리즘의 적합성

하이브리드 동력시스템 제어의 요점은 차량이 요구하는 동력을 동력시스템의 효율적인 운전을 통해 제공함과 동시에 배터리의 SOC를 효율이 좋은 목표점에서 유지시키는 데

있다[8-10]. 배터리의 초기 SOC가 목표 SOC에 벗어나 있는 경우 제안된 4.2의 하이브리드 동력제어전략에 따라 SOC가 목표 SOC로 수렴해나감에 또한 이를 유지하는지를 시뮬레이션으로 검증하였으며 그 결과는 Fig. 11과 같다.

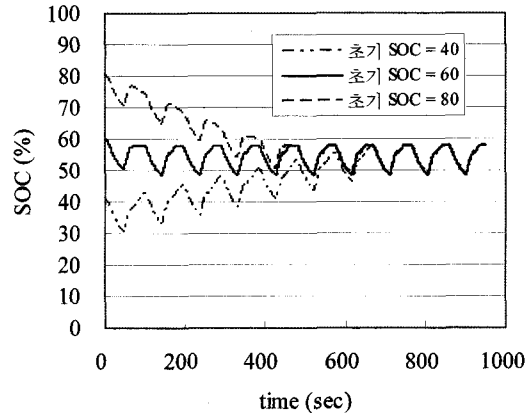
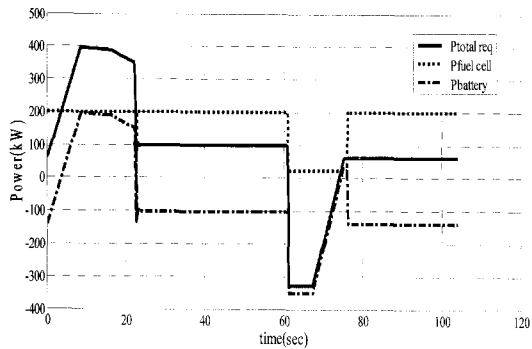


Fig. 11. Convergence of battery SOC during 10 cycles according to each initial SOC

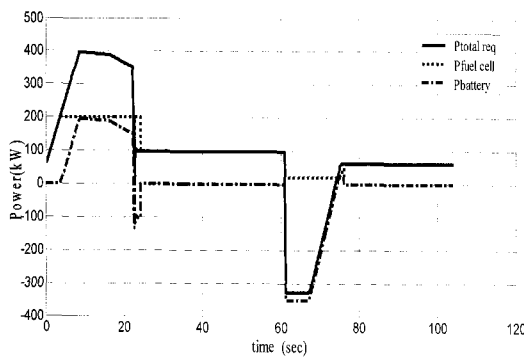
Fig. 11은 초기 SOC를 0.4, 0.6 및 0.8인 경우 각각에 대해 10개의 역(Station)을 연속적으로 주행한 결과이다. 초기에 목표 SOC에 벗어나 있지만 점차적으로 목표 SOC로 수렴해감을 알 수 있으며, 또한 목표 SOC에 수렴 이후 이를 유지하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 제안하고 있는 동력제어 알고리즘은 타당하다고 할 수 있다. 좀 더 구체적으로 제안하고 있는 동력제어 알고리즘이 주행모드상의 구간 별 요구하는 동력에 대해 초기 배터리 SOC별 어떻게 연료전지의 발전 출력을 결정하고 있는지를 파악하기 위하여 초기 SOC별 주행모드에서의 차량 요구동력과 연료전지의 발전 출력 그리고 배터리의 충전전 출력을 시뮬레이션 하였다. 이의 결과는 Fig. 12와 같다. 차량의 요구동력은 정차에서 출발시 가속에 따라 최고 속도에 이르기까지 증대되며 최고속도 이후 정속 주행에서는 차량의 가속 토크가 없기 때문에 요구동력은 작아진다. 감속이 시작되면 회생제동 동력과 차량의 보기류 등의 소모 요구동력이 가감된다. 또한 차량 정지후 정차 중에도 차량의 보기류 등의 소모동력이 발생 함을 알 수 있다.

차량의 요구동력에 대해 배터리의 초기 SOC별 동력제어 결과를 보면, 먼저 Fig. 12(a)와 같이 배터리 초기 SOC가 목표 SOC보다 낮은 0.4인 경우 차량 요구동력이 낮은 초기 가속시 연료전지의 동력은 차량의 요구동력과 배터리의 충전을 위한 동력을 더하여 결정되었음을 알 수 있다. 이후 차량 가속 구간에서는 차량 요구동력이 연료전지의 출력 용량보다 크기 때문에 배터리는 SOC가 낮음에도 차량의 요구동력을 만족하기위해 방전되고 있음을 알 수 있다. 또한, SOC가 낮기 때문에 차량 정차 중에도 연료전지를 발전하

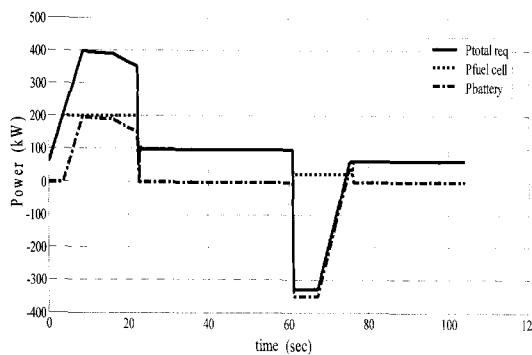
여 배터리를 충전하고 있음을 알 수 있다. Fig. 12(b)와 같이 배터리 초기 SOC가 목표 SOC와 같은 SOC가 0.55인 경우에는 속도가 큰 가속 구간을 제외한 대부분의 구간에서 차량요구동력을 연료전지 출력이 대응하고 있음을 알 수 있다. 초기 SOC가 큰 SOC 0.8인 경우 초기 가속 구간 및 차량 정속 주행과 같이 차량 요구 동력이 작은 경우 배터리만으로 차량요구 동력을 대응 하고 있음을 알 수 있다.



(a) Initial SOC of battery = 0.4



(b) Initial SOC of battery = 0.55



(c) Initial SOC of battery = 0.8

Fig. 12. Requested power of vehicle and power management by power control strategy

## 6. 결론

본 논문에서는 연료전지 하이브리드 동력시스템의 구성과

제어 개념을 토대로 경전철에 적용될 수 있는 연료전지 하이브리드 동력시스템의 설계와 제어전략에 대해 경전철의 주행 패턴을 근거로 제안하였다. 이들에 대한 Matlab/Simulink 기반의 시뮬레이터의 개발을 통하여 설계 및 제어 알고리즘을 검증하였다.

경전철의 운행 모드에 근거하여 연료전지의 용량에 대해서는 에너지 매니지먼트 관점에서 그리고 배터리의 용량에 대해서는 가속 구간에서의 배터리의 SOC 하한치를 고려하여 설계 할 것을 제안하였다. 이로부터 향후 개발하고자 하는 경전철의 차량 중량에 따라 연료전지 및 배터리의 용량 설계를 응용 할 수 있다. 또한, 주행 패턴에 근거 하여 제시된 동력제어 알고리즘은 시뮬레이션 결과 하이브리드 동력 제어에서 중요한 목표 SOC를 추종하고 유지함을 보임으로써 그 타당성을 알 수 있었다. 이것은 연료전지 및 배터리의 용량 설계 및 동력제어 알고리즘이 경전철의 주행패턴에 대해서 차량의 요구동력을 만족시키고 있는 결과 이다.

## 참고 문헌

1. Koichiro Muta, Makoto Yamazaki, Junji Tokieda(2004), "Development of New-Generation Hybrid System THS II-Drastic Improvement of Power Performance and Fuel Economy," SAE Technical Paper
2. Motomi Shimada, Ryosuke Furuta, Shinji Takeda(2007), "Trial Run of Fuel Cell Hybrid Traction System for Railcar," EVS23.
3. Hiroshi Nomoto, Tetsuro Omura, Eiichi Toyota, Motomi(2006), "Hybrid Traction System for Railway Vehicles," EVS22.
4. 이병승(2008), "철도차량용 친환경 수소-연료전지 Hybrid 시스템 기술동향," 한국철도학회지, 제11권 제3호, pp 29-31.
5. 최서호, 전순일, 임태원 (2005), "투산 연료전지 차량 개발," 한국자동차공학회 2005 전기자동차 심포지움.
6. Kim, Y.R., Choi, S.H., Lim, T.W., Cho, W.S.(2002), "Development of Hyundai Fuel Cell Hybrid Vehicle," EVS19.
7. 장세기, 목재균, 임태훈(2005), "연료전지 궤도차량의 동력시스템," 한국철도학회 2005년도 춘계학술대회 논문집, pp 101-106.
8. 함윤영, 송승호, 민병문, 노태수, 이재완, 이 현동, 김철수(2003), "직렬형 하이브리드 버스에서 보조동력장치의 고효율 작동을 위한 제어 알고리즘," Transaction of KSAE, Vol. 11, No. 5, pp.170-175
9. 최영춘, 박지만, 김동현, 김정민, 김영렬, 김현수(2007), "6x6 인휠구동 직렬형 하이브리드 차량의 동력제어 전략 개발," 2007 KSME 춘계학술대회 논문집, 제4권, pp. 2182-2187.
10. 김영렬, 박영호, 김영수 (2008), "철도차량용 연료전지하이브리드 동력시스템," 한국철도학회 2008 춘계학술대회 논문집, pp 844-850.

접수일(2009년 8월 17일), 수정일(2009년 9월 14일),  
 게재확정일(2009년 9월 22일)