

야전용 액체 연료개질 1 kW급 하이브리드 전원시스템 제어 연구

Control Model of 1 kW Class Tactical Hybrid Power Generation System with Liquid Fuel Processor

지 현 진*
Hyunjin Ji

하 상 현*
Sang Hyun Ha

김 영 철*
Youngchul Kim

조 성 백*
Sung-Baek Cho

Abstract

A fuel cell/secondary battery hybrid power generation system could extend well beyond the efficiency and interoperability of the conventional diesel generator. The suggested power source system consists of 2.3 kW class PEMFC, 100 Ah lithium polymer battery, and two DC/DC converters by serial connection type. It was known that interoperability of sub-systems is the key factor for stable and optimal control of the hybrid power generation system. The modeling and simulation methods have been proposed to reduce the number of configurations and performance tests for components selection and select the optimized control condition of the power generation system. The control model for power source system is implemented based on the empirical formulation and carried out in the Matlab/Simulink environment. The results show that the simulation can be used to establish the algorithm of prototype and increase the durability of the power source system.

Keywords : PEMFC(고분자 전해질형 연료전지), Lithium Polymer Battery(리튬 폴리머 전지)

1. 서론

현재 스트라이커(stryker), 브래들리(bradley), K21 등과 같은 차세대 보병 전투차량의 경우 정지 상태에서 각종 전자장비 작동을 위한 안정적인 전원 공급이 중요하기 때문에 추진용 디젤엔진 이외에 보조전원용 내연기관 발전기가 장착되어 있다. 그러나 내연기관 발

전기는 소음이나 적외선 신호에 의해 적에게 노출될 가능성이 높다. 특히 소음은 전투요원 간의 대화를 단절시켜 작전 효율성을 감소시키고 지속적인 노출에 의한 병사들의 정신적 스트레스를 증가시킬 수 있다. 따라서 소음이 적고 열발생량이 적은 1~5 kW급 연료전지 전원 시스템 개발은 작전의 효율성을 향상시킬 수 있으므로 기존 내연기관 발전기를 대체할 가능성이 있다. 그러나 대부분의 연료전지가 수소와 산소의 화학 반응을 통해 전기를 발생시키기 때문에 현재와 같이 수소연료에 대한 보급체계가 구축되어 있지 않은 상태에서 수소를 이용한 연료전지의 사용은 한계가 있다.

† 2011년 5월 3일 접수~2011년 6월 24일 게재승인

* 국방과학연구소 4기술연구본부 1부(ADD)

책임저자 : 지현진(rgnmaschine@add.re.kr)

따라서 가솔린, 디젤, JP-8과 같은 병참연료를 개질(reforming)하여 수소를 생산한 후 연료전지를 사용하는 과도기적 시스템의 개발이 필요하다. 현재 선진국에서 개발하고 있는 대부분의 군용 1 ~ 5 kW급 연료전지 시스템은 이러한 이유로 연료개질기(fuel reformer)를 장착하고 있다. 연료개질기를 포함한 연료전지 시스템의 경우, 기존의 화석연료를 사용해야 된다는 측면에서 완전한 탄소 제로(zero)를 달성한 것은 아니지만, 내연기관 대비 효율이 50 %이상 높기 때문에 탄소 배출량은 그만큼 줄어드는 효과를 얻을 수 있으므로 환경성과 균용성을 동시에 만족시킬 수 있는 전원시스템이라 평가받고 있다^[1].

본 연구에서는 대대급 지휘소에서 사용할 수 있는 연료전지-2차전지의 하이브리드 전원 시스템을 구성하고 최적운전을 위한 제어전략에 대하여 모델링 및 시뮬레이션을 수행하였다. 하이브리드 전원 시스템은 가솔린 연료개질기를 포함한 2.3 kW급 고분자 전해질형 연료전지(PEMFC : Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell)와 100 Ah급 리튬 폴리머 전지(lithium polymer battery)로 구성 되어 있고, 전력 흐름을 제어할 수 있도록 2개의 전력변환기 및 시스템 운전용 제어기가 포함되어 있다. 각 구성품들에 대한 모델은 수학적 이론 및 실험적 데이터를 바탕으로 개발되었으며, Matlab/Simulink[®] 환경을 통해 제어 전략에 따른 연료전지 및 리튬 폴리머 전지의 특성 변화, 시스템의 효율 변화, 리튬 폴리머 전지 충/방전 특성 등에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 연료전지 전원시스템 모델

가. 연료전지 전원시스템 구성

연료전지 전원시스템은 Fig. 1과 같이 크게 가솔린 연료로부터 수소를 생산하는 연료개질기(fuel reformer), 수소로부터 전력을 생산하는 연료전지 스택(stack), 생산된 전력을 충전 혹은 방전하는 리튬 폴리머 전지, 연료전지 스택이나 리튬 폴리머 전지의 전압을 사용자의 요구하는 전압으로 변경시켜주는 전력변환기로 구성된다.

가솔린 연료개질기를 포함한 연료전지 스택은 리튬 폴리머 전지와 비교하여 상대적으로 전류에 대한 동특성이 낮기 때문에 연료전지 스택과 리튬 폴리머 전지는 직렬형 하이브리드(hybrid) 형태로 구성하여 운전

되도록 하였다.

연료전지 스택은 전원시스템 인가부하(1.5 kW), 주변 장치의 기생 전력, 전력변환기의 효율, 리튬 폴리머 전지의 충전 전력 등을 고려하여 최대출력 2.3 kW가 되도록 설계하였다. 가솔린 연료개질기는 연료전지 스택의 최대출력 및 화학양론 등을 고려하여 크기 및 성능을 결정하였다.

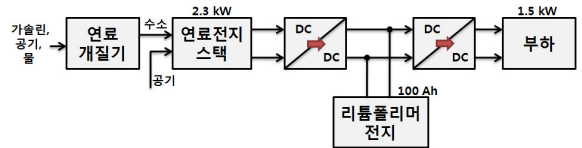


Fig. 1. 연료전지 전원 시스템의 구성

나. 연료전지 스택 모델

고분자 전해질형 연료전지의 단위전지 전압은 식 (1)과 같이 운전 조건에 따라 개방회로 전압(E)에 대해 활성화 분극(activation loss, η_{act}), 저항 분극(ohmic loss, η_{ohm}), 농도차 분극(concentration loss, η_{conc})의 3가지 전압강하에 차로 표현이 된다^[2~4].

$$V_{cell} = E - \eta_{act} - \eta_{ohm} - \eta_{conc} \quad (1)$$

여기서 개방회로전압 E는 네른스트(nernst) 전압으로서 작동 온도와 반응물의 분압에 대한 함수로 식 (2)와 같이 표현가능하다.

$$E = E_0 - 0.85 \times 10^{-3} (T - 298.15) + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}^{0.5} P^{0.5}} \right) \quad (2)$$

이때 E_0 는 표준전위(1.229 V), F는 패러데이 상수(96485 C/mol), P_{H_2} , P_{O_2} , P_{H_2O} 는 수소, 산소, 수증기의 분압, P는 전체 압력을 의미한다. 식 (2)에서 볼 수 있듯이 연료전지의 개방회로전압은 작동 온도와 수증기의 분압이 증가할수록 감소한다.

식 (1)에서 활성화 분극과 농도차 분극은 이론식을 기초로 하여 식 (3)과 같이 간략히 표현이 가능하다.

$$V_{cell} = E - (a_A + b_A \ln i) - (a_C + b_C \ln i) - (i ASR)_{ohmic} - c \ln \frac{i_L}{i_L - i} \quad (3)$$

이때 $(a_A + b_A \ln i) + (a_C + b_C \ln i)$ 는 음극과 양극의 활성화 분극, $iASR_{ohmic}$ 는 저항 분극, $c \ln(i_L / (i_L - i))$ 은 농도차 분극을 의미하며, $a_A, b_A, a_C, b_C, ASR_{ohmic}, c, i_L$ 은 상수, i 는 전류 밀도를 나타낸다.

연료전지 스택은 단위전지를 적층하여 구성되기 때문에 스택 모델 역시 단위전지 모델을 기초로 하여 개발되었다. 연료전지 단위 전지 및 스택 모델을 위한 기본 물성치는 Table 1과 같다.

Table 1. PEMFC의 전기적 특성값

Fuel Cell Stack	
Type	PEM
Max Power	2,300 W
Voltage (@ 320 A/cm ²)	36 V _{DC}
Current Density	70 A (350 A/cm ²)
Number of Cells	50
Fuel	Reformate

다. 연료 개질기 모델

연료개질기는 운전방식에 따라서 수증기 개질(steam reforming), 부분산화 개질(partial oxidation reforming), 자열 개질(auto-thermal reforming)로 구분될 수 있다. 수증기 개질은 가솔린 연료와 수증기의 흡열반응을 통해 수소를 획득하는 방식으로 수소 수율이 좋으나 외부에서 계속적인 열공급이 필요하다는 단점이 있다. 부분산화 개질은 가솔린 연료와 산소의 발열 반응으로 수소를 획득하는 방식으로 수증기 개질보다 상대적으로 수소 수율은 낮으나 추가적인 외부 열공급이 필요 없다는 장점이 있다. 자열 개질은 수증기 개질과 부분산화 개질을 동시에 사용함으로써 보다 효과적으로 반응기 설계가 가능하다. 따라서 독립형으로 운전되는 연료전지 전원 시스템의 경우에는 외부에서 추가적인 열공급이 필요 없고 초기 시동이 빠른 자열개질 방식을 적용하는 것이 유리하다.

가솔린 연료는 C₄와 C₁₂사이의 탄화수소계열 분자들로 구성되어 있으나 시뮬레이션을 위해서는 C₈H₁₈가 가솔린 연료를 대표할 수 있다고 가정하고 연구를 수행하였다^[5]. 본 연구에 사용된 연료 개질기 모델은 가솔린, 물 및 공기의 공급량에 따라 반응기 후단의 열 및 물질 수지를 계산하기 보다는 연료전지 스택 요구 출력을 만족시키기 위한 필요 수소량을 계산한

다음, 이를 생산하기 위한 반응기 앞단의 가솔린, 물 및 공기의 필요량을 계산하도록 하였다. 이를 위하여 Minimization of Gibbs Energy 원리를 이용하였다.

$$g = \sum_{j=1}^{NS} \mu_j n_j \tag{4}$$

이때 NS는 화학종수, μ 는 단위 몰당 화학적 퍼텐셜(chemical potential), n은 몰수를 의미한다.

가솔린 연료개질기는 반응기 온도 유지, 수소 수율 등을 고려하여 H₂O/C = 2, O₂/C = 0.7의 비율로 운전 되도록 모델링하였다.

라. 리튬 폴리머 전지 모델

2차 전지는 전기적 동특성을 표현하기 위해 내부저항 모델, 저항 콘덴서 모델 등이 사용되고 있다^[6]. 본 연구에서는 2차 전지의 동적 특성을 보다는 전류에 따른 전압 및 SOC의 변화가 중요하기 때문에 단순히 리튬 폴리머 전지의 용량과 작동 전압에 관련된 모델을 개발하여 사용하였다.

리튬 폴리머 전지의 용량은 방전되는 전류의 크기에 따라 변한다. 전기가 시간 t까지 방전되기 위한 인가전류 I는 식 (4)와 같이 표현될 수 있다.

$$I_{T=t} = \frac{k c q_{max,0}}{1 - e^{-kt} + c(kt - 1 + e^{-kt})} \tag{5}$$

이때 k는 반응률, $q_{max,0}$ 는 전지에서 얻을 수 있는 최대 용량(극미한 전류로 방전했을 경우), c는 전체전지 용량에 대한 실제 이용 가능한 전하용량의 비를 말한다. 나아가 식 (5)에서 계산된 I와 방전가능시간인 t의 곱으로 최대방전용량인 $q_{max}(I)$ 를 구할 수 있다.

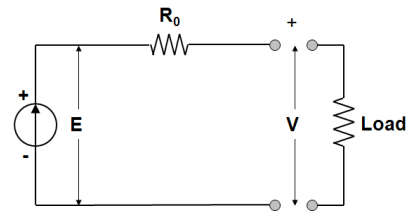


Fig. 2. 리튬 폴리머 전지 모델

리튬 폴리머 전지는 Fig. 2와 같은 이상전원 E와 내부저항 R₀인 등가 회로를 가정하여 모델링할 수 있

다. 즉, 작동 전압은 식 (6)와 같이 개회로 전압(OCV : Open Circuit Voltage)과 내부저항 및 인가전류에 따른 전압강하의 차로 표현할 수 있다.

$$V = E - I \times R_0 \quad (6)$$

리튬 폴리머 전지의 개방회로전압 E는 전지의 내부 용량에 따라 변화될 수 있다.

$$E = E_0 + AX + CX / (D - X) \quad (7)$$

이때 E₀는 100 % 충전된 2차 전지의 개방회로전압, A는 충전상태에 따른 내부전압의 초기선형변화에 대한 상수, C와 D는 충전전지 전지전압의 변화에 대한 상수를 의미한다. 또한 X는 2차전지의 소모된 표준 전지 용량으로 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$X = \frac{q_{\max}(I) - q_{out}}{q_{\max}(I)} \times q_{\max,0} \quad (8)$$

$$q_{out} = \int Idt \quad (9)$$

또한 리튬 폴리머 전지의 SOC는 식 (9)와 같이 표현된다.

$$SOC = \frac{q_{\max,0} - q_{out}}{q_{\max,0}} \quad (10)$$

식 (5)~식 (10)에서 알 수 있듯이 리튬 폴리머 전지의 출력 전압은 ①전지의 충전 혹은 방전 상태 ②전지의 SOC ③전지의 내부저항 ④충전 혹은 방전 전류의 크기에 의해서 결정될 수 있다. 또한 리튬폴리머 전지의 잔류 용량은 방전 전류의 크기에 의해서 변화될 수 있다.

마. 주변장치 모델

연료전지 전원 시스템은 공기 공급 및 냉각용 블로어(blower), 연료 및 물 공급용 펌프(pump) 등과 같은 다양한 주변장치가 필요하다. 이러한 주변장치의 소비 전력은 인가 부하에 따라 변화된다. 본 연구에서는 블로어 및 펌프 등과 같은 주변기기에 대하여 이론식을 바탕으로 모델을 개발하기 보다는 인가 부하의 변화에 따른 소비전력의 총합의 변화에 대해서만 고려하였다. 연료전지 전원시스템의 주변기기는 최소 300 W에서

최대 500 W까지 인가부하에 따라 선형적으로 소비전력이 변한다고 가정하였다.

바. 전원 시스템 운전 전략

연료개질기는 연료, 수증기, 공기의 반응물의 촉매 반응을 통해 수소를 생산하는 장치로서, 부하 변동에 따른 반응속도가 연료전지, 2차전지 등과 같은 주변 장치에 비하여 상대적으로 낮다. 따라서 연료개질기는 전체 전원 시스템에서 율속 단계(rate determining step)에 해당한다고 볼 수 있다. 또한 연료개질기를 정적 상태로 연속 운전하게 되면 내구성이 향상되고 촉매의 탄소 침적 및 일산화탄소의 발생을 억제할 수 있기 때문에 연료개질기를 최대한 정적 운전 상태로 유지해야 한다. 그러나 연료개질기를 한 지점에서만 운전하게 되면 전원시스템의 전체 효율이 감소될 수 있다. 따라서 전원시스템이 감당해야할 부하, 리튬 폴리머 전지의 용량 등을 고려하여 연료전지 스택의 운전점(operating point)을 3개로 제한하였다. 연료전지 전원 시스템은 연료전지 스택과 리튬 폴리머 전지가 두 개의 전력변환기를 통해 직렬형 하이브리드로 구성되어 있으므로, 만약 인가부하가 연료전지 스택의 전력 생산량을 벗어나더라도 리튬 폴리머 전지가 충분히 보상해 줄 수 있다. 즉 해당 운전점에서 운전되는 연료 전지 스택의 생산 출력이 요구 부하와 비교하여 과잉 전력을 생산하고 있으면 잉여 전력을 리튬 폴리머 전지에 충전하고, 연료전지 스택에서 생산되는 전력이 부족하면 리튬 폴리머 전지에서 부족분만큼 보조하게 된다.

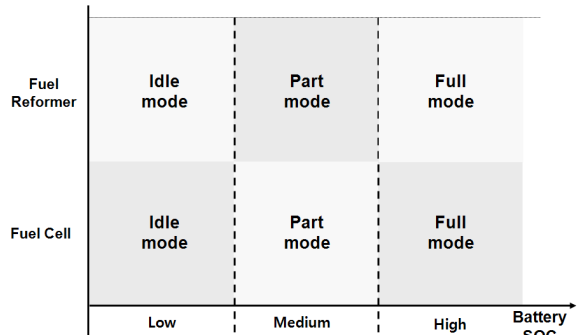


Fig. 3. 연료전지 전원시스템의 운전 영역

연료전지 스택의 운전점은 무부하(idle load), 부분부하(part load), 최대 부하(full load)로 구분하였으며, 연

료개질기 역시 연료전지 스택의 화학양론(stoichiometry number)을 고려하여 수소를 충분히 공급할 수 있도록 운전점이 변한다. 이때 연료개질기와 연료전지의 운전점은 리튬 폴리머 전지의 SOC에 의해서 결정된다. 그러나 SOC의 변경에 따른 잦은 운전점 변화를 방지하기 위하여 해당 운전점에서 적어도 일정시간은 유지하도록 설정하였다. 본 연구에서는 연료개질기, 연료전지 스택, 리튬폴리머 전지 등의 특성을 고려하여 시뮬레이션을 위한 기준 운전 전략은 Table 2와 같이 설정하였다.

Table 2. 전원 시스템 기본 운전 전략

항 목	기본 운전 전략	
연료개질기 + 연료전지 운전 전략	Idle	670 W
	Part	1630 W
	Full	2300 W
리튬 폴리머 전지 SOC 제어전략	Low	20 ~ 50
	Medium	50 ~ 80
	High	80 ~ 100
초기 SOC	30 %	
인가부하	240 ~ 1,500 W	
주변장치 소비전력	300 ~ 500 W	
운전점 최소유지시간	30 분	

3. 시뮬레이션 결과 및 분석

가. 전원 시스템 시뮬레이션

전원 시스템에 대한 시뮬레이션을 수행하기 위하여 연료개질기, 연료전지 스택, 리튬 폴리머 전지, 제어전략에 대한 수학적 모델을 바탕으로 Matlab/Simulink® 환경을 사용하였다. 시뮬레이션 시간은 지휘소의 연속 작전 상황을 고려하여 1,440분(24시간)으로 설정하였다.

시뮬레이션 결과의 정확도를 향상시키기 위하여 전체 전원 시스템에 대한 시뮬레이션에 앞서 연료전지 및 리튬 폴리머 전지 모델에 대한 시뮬레이션을 수행하여 실험데이터와 비교하였다. Fig. 4는 연료전지 스택에 대한 전류-전압 성능 곡선으로 시뮬레이션 결과를 실험결과와 비교하여 보여주고 있다. 연료전지 스택의 전압은 전류밀도가 증가할수록 활성화 분극, 저

항분극, 농도차 분극에 의해서 감소되는 것을 확인할 수 있으며, 전류 밀도가 0 ~ 1.2 A/cm² 구간에서 시뮬레이션 결과가 실험데이터와 거의 일치하는 것을 볼 수 있다.

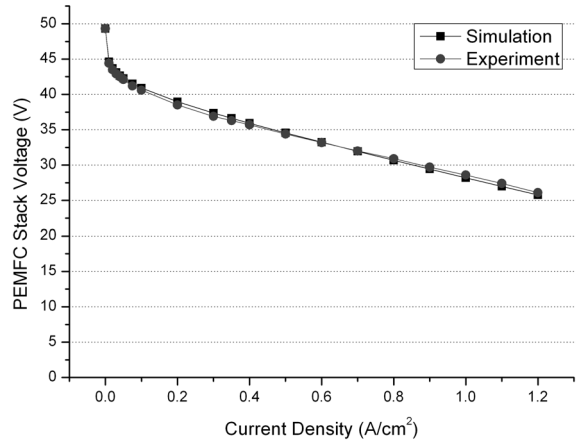


Fig. 4. 연료전지 스택 성능 곡선

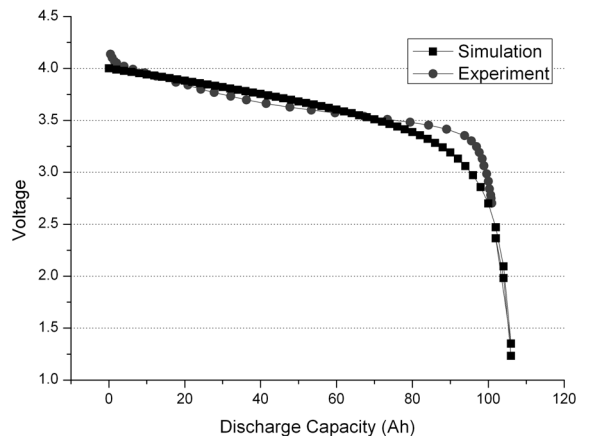


Fig. 5. 리튬 폴리머 전지 성능 곡선(1C = 100A 기준)

나. 인가 부하에 따른 영향

Fig. 5는 리튬 폴리머 전지의 용량-전압 성능곡선으로서 100 Ah 단위전지에 대한 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교하여 보여주고 있다. 리튬 폴리머 전지는 방전용량에 따라 전압이 약 4.0 V에서부터 점차 감소하는 것을 볼 수 있다. 비록 단위 전지의 평탄구간에서 시뮬레이션 결과가 실험데이터와 비교하여 기울기 및 변곡 구간이 차이가 있지만 전체적으로 리튬 폴리머 전지의 성능을 모사하고 있다. 특히 본 연구에서

사용되는 리튬 폴리머 전지의 경우 SOC가 30 ~ 80 %에서 주로 운용되기 때문에 시스템 시뮬레이션 수행 시 오차는 더욱 감소될 수 있다.

인가부하의 종류 및 특성은 전원 시스템 및 제어 전략을 설계하는데 중요한 인자로 작용한다. 그러나 전원시스템이 감당해야할 지휘소의 인가 부하의 종류 및 동특성을 정확하게 정의하기는 현실적으로 불가능하다. 본 연구에서는 예상 가능한 인가 부하의 특성을 크게 두 가지로 분류하여 시뮬레이션을 수행하였다.

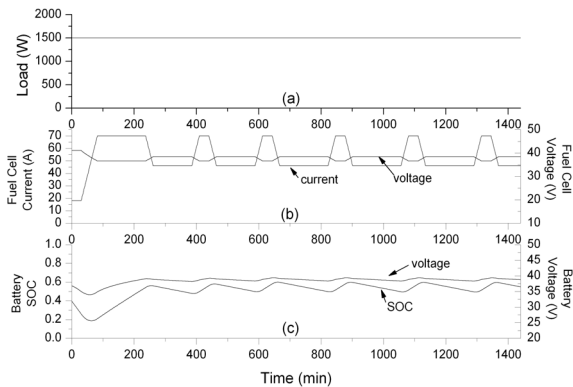


Fig. 6. 인가 부하에 따른 연료전지 및 리튬폴리머 전지의 성능변화(정적 부하 조건)

Fig. 6은 인가 부하가 연속적으로 최대출력인 1.5 kW를 요구할 경우에 대한 시뮬레이션 결과이다. 초기 리튬 폴리머 전지의 SOC가 low 영역에 있기 때문에 운전전략에 따라 연료전지는 full 모드로 운전되는 것을 볼 수 있다. 연료전지 및 연료개질기의 동특성을 고려하여 full 모드로 변경될 때 까지 약 100분의 시간이 소요되었으며, 이때까지는 연료전지 생산 전력이 충분하지 않아 리튬 폴리머 전지가 부하인가를 담당하고 있어 SOC가 감소하였다. 100분 이후에는 연료전지가 full모드에서 충분한 전력을 생산하고 있기 때문에 인가부하의 대부분을 공급하였고 잉여 생산 전력은 리튬 폴리머 전지를 충전하여 SOC를 상승시켰다. 연료전지에 의해 리튬 폴리머 전지가 충전되어 SOC가 low 영역에서 medium 영역으로 전환되면 운전전략에 따라 연료전지 역시 full 모드에서 part 모드로 전환되는 것을 볼 수 있다(200 ~ 300분 부근). part 모드에서는 연료전지의 생산 전력이 인가부하보다 적기 때문에 리튬 폴리머 전지로부터 추가 전력이 공급되어 SOC가 감소

되었으며, SOC가 low 영역에 들어가게 되면 연료전지는 다시 part 모드에서 full 모드로 전환하였다(300 ~ 400분 부근). 이후 1440분까지는 리튬 폴리머 전지의 SOC가 low 및 medium 영역을 반복적으로 이동하여 연료전지역시 part 모드와 full 모드로 전환되면서 운전하였으며, 리튬 폴리머 전지의 최종 SOC 목표는 low와 medium의 경계점인 50 %로 유지되고 있는 것을 볼 수 있다.

두 번째로 Fig. 7은 평균은 870 W이지만 최소 240 W에서 최대 1.5 kW까지 무작위로 변화하는 인가 부하에 대한 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 운전 초기에는 리튬 폴리머 전지의 SOC가 40 %이기 때문에 운전전략에 따라 약 110분까지 연료전지가 full 모드로 운전되는 것을 볼 수 있다. 이때 연료전지의 전력 상승률은 연료개질기의 동특성을 고려하여 3 W/sec로 제한되었다. 또한 45분까지는 연료전지에서 충분한 전력 공급이 불가능하므로 리튬 폴리머 전지에서 상당부분을 보충하고 있어 SOC가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이후 연료전지가 full 모드로 운전되면서 연료전지에서 생산된 전력이 인가 부하를 담당하고 나머지 전력을 리튬 폴리머 전지를 충전하므로 리튬 폴리머 전지의 전압 및 SOC가 상승하였다. 리튬 폴리머 전지의 SOC가 50 % 부근에 도달한 이후에는 연료전지의 운전모드가 full 모드에서 part 모드로 전환되었다(110분 ~ 140분). 연료전지가 part 모드로 운전되면 생산출력이 1,630 W이므로 인가부하와 BOP의 소비전력을 제외하더라도 약 200 ~ 300 W의 전력이 남으므로 리튬 폴리머 전지를 천천히 충전하는 것을 볼 수 있다(140분 ~ 260분).

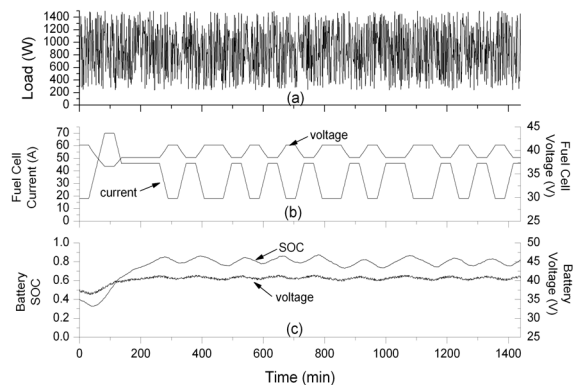


Fig. 7. 인가 부하에 따른 연료전지 및 리튬폴리머 전지의 성능변화(동적 부하 조건)

리튬폴리머 전지의 SOC가 80 % 이상이 되면 연료 전지는 part 모드에서 idle 모드로 전환되며, 인가 부하가 연료전지 생산전력보다 크기 때문에 리튬 폴리머 전지의 SOC가 감소한다(260 ~ 320분). 이후 1440분까지는 리튬 폴리머 전지의 SOC가 medium 및 high 영역을 반복적으로 이동하여 연료전지 역시 part 모드와 idle 모드로 전환되면서 운전하였다. 리튬 폴리머 전지의 최종 SOC 목표는 medium와 high 경계점인 80 %로 유지되는 것을 볼 수 있다.

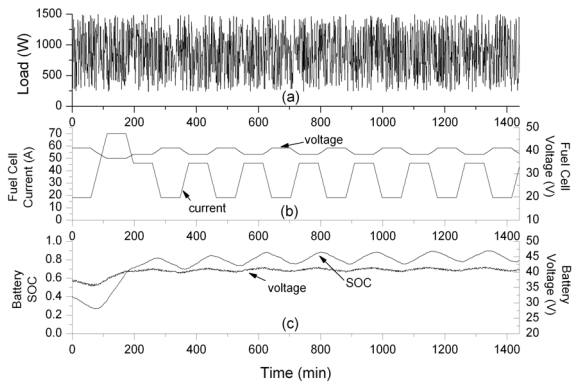


Fig. 8. 인가 부하에 따른 연료전지 및 리튬폴리머 전지의 성능변화(유지시간 60분)

다. 운전 유지시간에 따른 영향

Fig. 8은 운전점 최소유지시간을 30분에서 60분으로 증가하였을 경우, 동적 부하 조건에 대한 시뮬레이션 결과이다. 전반적으로 연료전지 운전 및 리튬 폴리머 전지의 SOC 변화 경향성이 Fig. 7과 유사하였다. 그러나 300분까지의 연료전지의 운전점 변화를 비교해 보면 Fig. 7(b)에서는 연료전지가 초기 full 모드 도착 후 30분 동안 운전되었지만 Fig. 8(b)에서 60분간 운전되면서 part 모드의 운전시간이 120분에서 60분으로 감소하였다. 이것은 full 모드에서의 운전시간이 증가함에 따라 연료전지가 리튬 폴리머 전지를 충분히 충전하였기 때문이다. 또한 300분 이후부터는 운전점 최소 유지시간이 30분에서 60분으로 증가하여 연료전지의 운전점 변화 횟수가 20회에서 16회로 감소하였다. 연료 개질기의 경우 운전점이 변화하는 과도기에서 일산화탄소의 농도가 연료전지 스택의 허용치 이상으로 상승할 가능성이 존재한다. 뿐만 아니라 연료개질기의 반응기 온도가 변하기 때문에 내부 촉매의 내구성이 감소할 수 있다. 따라서 최소유지시간을 증가시켜 연료

개질기의 운전점 변화 횟수를 4회 감소시켰다는 것은 시스템 내구성을 향상시키는 점에서 효과적인 운전 전략 방법 중에 하나라고 판단할 수 있다.

라. SOC 상한값에 대한 영향

Fig. 9는 리튬 폴리머 전지 SOC 제어전략 중 상한값을 80 %에서 90 %로 증가하였을 경우, 동적 부하 조건에 대한 시뮬레이션 결과이다. 전반적으로 연료전지 운전 및 리튬 폴리머 전지의 SOC 변화 경향성이 Fig. 7과 유사하였다. 그러나 연료전지의 경우 리튬 폴리머 전지의 SOC 목표 상한 값인 90 %를 만족하기 위하여 초기 full 모드 직후 part 모드 운전이 120분에서 190분으로 증가하였다. 또한 리튬 폴리머 전지 SOC의 상한값이 90 %로 증가함에 따라 연료전지는 초기에 충분한 시간동안 full 모드 및 part 모드로 운전되기 때문에 후반부의 part ↔ idle 변화 구간이 전반적으로 뒤쪽으로 지연되어 운전점 변화 횟수가 20회에서 18회로 감소되는 효과가 있었다. 이후 1440분까지는 리튬 폴리머 전지의 SOC가 medium 및 high 영역을 반복적으로 이동하여 리튬 폴리머 전지의 평균 SOC는 medium과 high 경계점인 90 %로 유지되는 것을 볼 수 있다. 그러나 Fig. 9(b)에서도 볼 수 있듯이 후반부에 리튬 폴리머 전지의 SOC가 최대 97 %까지 상승하였기 때문에 만약 평균 인가 부하가 870 W 이하일 경우 SOC가 100 %를 초과할 수 있다. 리튬 폴리머 전지의 SOC가 100 %를 초과할 경우 연료전지는 최소유지시간 동안 운전되지 못하고 part 모드에서 idle 모드로 운전점의 변화가 필요할 수도 있기 때문에 오히려 변화횟수가 증가될 가능성도 있다.

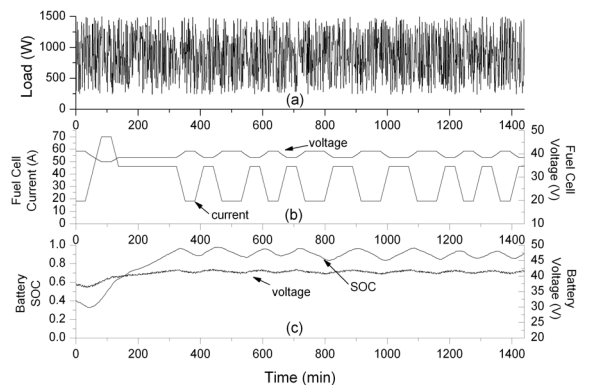


Fig. 9. 인가 부하에 따른 연료전지 및 리튬폴리머 전지의 성능변화(SOC 상한값 90 %)

Table 3. 연료전지 전원시스템의 시뮬레이션 결과 비교

순번	입력변수						시뮬레이션 결과			
	부하 조건	SOC				운전점 최소유지 시간(분)	요구 전력량 (Wh)	연료전지 생산전력량(Wh), 요구대비 비율	운전점 변화 횟수	최종 SOC 목표
		Low	Med	High	초기 SOC					
1	정적	20	50	80	40	30	36000	47760 (133 %)	12	50(Med)
2	동적	20	50	80	40	30	20800	31821 (153 %)	20	80(High)
3	동적	20	50	80	40	60	20800	31706 (152 %)	16	80(High)
4	동적	20	50	90	40	30	20800	32292 (155 %)	18	90(High)

마. 결과 분석

Table 3은 인가부하의 조건, SOC 상한값의 변화, 운전점 최소유지시간을 시뮬레이션 입력 변수로 고려하였을 때 생산 전력량 및 운전점 변화 횟수 등에 대한 시뮬레이션 결과를 보여 주고 있다. 인가부하의 평균값이 다를 경우에는 요구전력량 대비 연료전지 생산 전력량 비율 및 최종 SOC 목표값이 다르게 나타났다. 순번 2 ~ 4의 결과와 같이 만약 전원시스템의 인가 부하조건이 동일하다면 SOC 상한값, 최소유지 시간과 같은 제어변수의 변화는 연료전지 생산 전력량 및 최종 SOC 목표값에는 큰 영향을 미치지 않았다. 즉 인가 부하가 동일하더라도 제어 전략에 따라 요구전력량 대비 연료전지 생산 전력량 비율이 1~3 % 정도 차이가 있었다. 하지만 연료전지에서 생산된 여분의 에너지는 모두 리튬 폴리머 전지에 저장될 수 있기 때문에 전원시스템 효율에는 영향을 미치지 않는다.

그러나 인가 부하가 동일하다고 하더라도 연료전지의 운전점이 변화하는 횟수는 제어전략에 따라서 차이가 존재하였다. 연료개질기의 경우 운전점이 변화하는 과도기에서 일산화탄소의 농도가 연료전지 스택의 허용치 이상으로 상승할 가능성이 존재한다. 뿐만 아니라 연료개질기의 반응기 온도가 변화하기 때문에 내부 촉매의 내구성이 감소할 수 있다. 따라서 시스템 내구성을 향상시키기 위해서는 연료전지 및 연료개질기의 운전점 변화 횟수를 감소시켜야 한다. 시뮬레이션 결과, SOC의 상한값 및 운전점 최소유지시간 모두 운전점 변화 횟수에 영향을 미쳤으며, SOC 상한값보다는 운전점 최소유지시간의 제어변수가 더 크게 작용 한다는 것을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 지휘소용 1.5 kW급 연료전지-2차전지 하이브리드 전원시스템 제안하였고 주요 구성품에 대한 모델링을 바탕으로 최적 제어 전략을 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과, 인가부하의 조건, SOC 상한값의 변화, 운전점 최소유지시간의 입력 변수에 따라 연료전지의 효율 및 내구성 등에 영향을 주었다. 이러한 결과는 추후 제작될 1 kW급 연료전지 전원 시스템에 제어시스템의 알고리즘으로 반영되어 실제 운용시험 결과와 비교 분석할 계획이다.

References

- [1] 지현진, 조성백, “군용 연료전지의 필요성 및 발전 방향”, 국방과학기술플러스, Vol. 122, 2011.
- [2] 지현진, “연료전지 시스템의 최적운전에 대한 기초 연구”, 국방과학연구소, ADDR-410-080679, 2008.
- [3] 지현진, “연료전지 시스템 설계를 위한 기초 모델 연구”, 국방과학연구소, ADDR-410-071106, 2008.
- [4] Ryan O'Hayre, Suk-Won Cha, Whitney Colella, Fritz B. Prinz, “Fuel Cell Fundamentals”, John Wiley & Sons, 2006.
- [5] Christopher Severin, Stefan Pischinger, Jurgen Ogrzewalla, “Compact Gasoline Fuel Processor for Passenger Vehicle APU”, Journal of Power Sources, Vol. 145, pp. 675~682, 2005.
- [6] V. H. Johnson, “Battery Performance Models in ADVISOR”, Journal of Power Sources, Vol. 110, pp. 321~329, 2002.