

PEM 연료전지시스템의 동특성 해석

김 범수¹⁾, 전 순일²⁾, 임 원식³⁾, 박 영일⁴⁾

Dynamic Analysis of PEM fuel cell system

Beonsoo Kim, Soonil Jeon, Wonsik Lim, Yeong-il Park

Key words : Fuel cell(연료전지), Dynamic model(동적 모델), Transient response(과도 응답), Oxygen excess ratio(산소 과급비), System efficiency (시스템 효율), Humidity (가습)

Abstract : We developed a dynamic model of PEM fuel cell system which can analyze its transient response to dynamic load current. System components such as compressor, air cooler, humidifier, and stack were modeled based on their dynamic equations and performance maps by using Matlab Simulink platform. Through this simulation model, dynamic characteristics of fuel cell system including oxygen excess ratio, stack voltage, and system efficiency were shown. In addition to that, we briefly analyzed the humidity effect on cathode pressure and system efficiency, expecting that this model can be further used to optimize fuel cell system parameters just like operating pressure and temperature, humidity, and oxygen excess ratio.

Nomenclature

- τ_m : motor torque (N-m)
- w_{cp} : compressor rotational speed (rad/s)
- T_{cd} : air cooler temperature ($^{\circ}$ C)
- \dot{m} : mass flow rate (kg/s)
- P_{ca} : cathode pressure (bar)
- V_{st} : stack voltage (volt)
- μ : fuel utilization coefficient
- η_{st} : stack efficiency (%)
- ϕ^{des} : desired relative humidity (%)

(PEMFC)가 있다. 고분자 연료전지(PEMFC)는 이온 전도성 고분자막으로 구성된 전해질과 다공성 기체 확산이 가능한 anode, cathode 로 구성되어 있다.

우선적으로 연료전지 차량(FCEV), 연료전지 하이브리드 차량(FCEV) 적용에 앞서 연료전지 시스템에 대한 기술 분석이 먼저 이루어져야 한다. 또한 차량의 안정적인 동력 공급을 통한 성능 향상과 급격한 출력 변화에 의한 시스템의 과도 상태 응답성을 파악하여야 한다.

본 연구에서는 시스템의 과도 상태에 따른 응답성에 중점을 두어 압축기, 가습기, 냉각기, 스택 등 시스템 구성 단품을 Matlab/ Simulink 를 이용하여 모델링 하고, 이를 기초로 모터의 전압 과 스택의 전류 변화에 따른 서브시스템의 동적

1. 서론

최근 차세대 자동차의 동력원으로써 연료전지에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 연료전지는 공급 연료 반응에 의한 Gibbs Free Energy 를 이용한 전기 화학적 변환 장치로써, 미래의 수소 에너지 체계에 가장 적합한 동력원이다. 현재 까지 개발된 다양한 연료전지 스택 중 차량 탑재와 적용이 가능한 연료전지로 고분자 연료전지

-
- 1) 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : twen25@mailvib.snu.ac.kr
Tel : (02)880-8050 Fax : (02)883-8042
 - 2) 현대기아 연구개발본부 선행개발센터
E-mail : soonill@hyundai-motor.com
Tel : (031)369-7480 Fax : (031)369-7622
 - 3) 서울산업대학교 자동차공학과
E-mail : jimws@snut.ac.kr Tel : (02)970-6392
 - 4) 서울산업대학교 자동차공학과
E-mail : yipark@snut.ac.kr Tel : (02)970-6352

거동 특성을 분석한다. 압축기를 구동하는 모터 전압 PI 제어를 통해 공급 공기의 유량, cathode 산소 분압을 제어하여 시스템 순출력, 순효율 특성을 연구한다. 또한 요구 습도량에 의한 cathode와 anode의 압력에 의한 연료전지의 성능 변화를 해석하여, 이를 토대로 연료전지 스택 시스템의 성능 인자 해석과 운전 작동점에 대해 분석한다.

2. 연료전지 시스템 모델링

연료전지 시스템은 Fig.1 에서와 같이 크게 공기 공급 장치 시스템, 수소 공급 장치 시스템, 냉각 장치 시스템, 가습조절 장치 시스템, 스택 시스템 다섯 개의 서브시스템으로 구성되어 있다.

가압형 스택 시스템의 경우 압축기를 장착하여 공급 공기 유량과 압력을 제어함으로써 스택의 운전 작동점을 고효율 영역으로 바꿀 수 있는 이점이 있다.

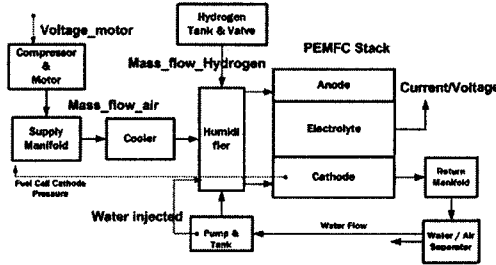


Fig. 1 Fuel cell stack system

2.1 압축기 모델

제어가 비교적 간단한 직권형 전동기를 이용하여 압축기를 구동하는 모터를 모델링 하였다. 시스템의 요구 출력을 만족시키는 공급 공기 유량(\dot{m}_{cp})을 통해 압축기 요구 토크(τ_{cp})가 식(3)에 의해 결정되고, 식(1)에서 모터 토크(τ_m)의 부하로서 작용한다.²⁾

$$J_{cp}\dot{\omega}_{cp} = \tau_m - \tau_{cp} \quad (1)$$

$$\tau_m = \eta_m \frac{k_a}{R_m} (V_m - k_b \omega_{cp}) \quad (2)$$

$$\tau_{cp} = \frac{C_p T_{atm}}{\eta_{cp}} \left[(P_{ratio})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \frac{\dot{m}_{cp}}{\omega_{cp}} \quad (3)$$

압축기 회전속도(ω_{cp})는 상태변수로, 모터 전압(V_m)은 입력변수로 두어 압축기의 요구 토크를 만족시키는 상태 방정식을 유도하여 PI 제어를 하였다. Fig.2, Fig.3 은 압축기의 회전 속도와 압력비에 따른 공급 공기 유량과 소모 동력

맵을 각각 나타낸 것이다. 최대 2.5bar로 가압 시 최대 공급 공기 유량 0.11822 kg/s, 최대 파워 13.233 kW 의 압축기를 모델링하였다. 펌핑 데이터를 이용하여 요구 출력 변화에 의한 과도 상태에서의 공급 공기 유량과 소모 동력을 산출하였다.

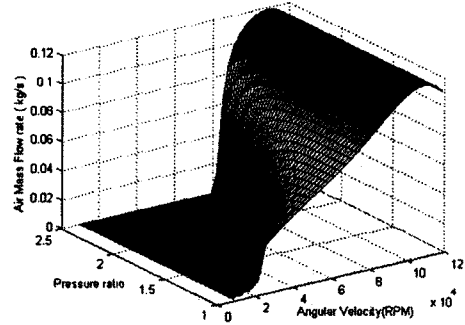


Fig. 2 Compressor performance map

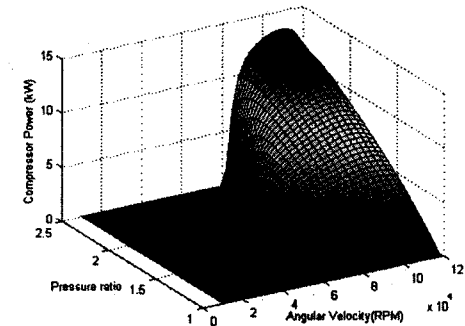


Fig. 3 Compressor power map

2.2 냉각 장치 모델

압축기를 지나 공급되는 공기는 2.5bar로 가압 시에 최대 137°C까지 상승하게 된다. 이러한 고온 상태에서의 고분자 전해질 막의 손상을 막기 위해 공급 공기 냉각이 필수적이다. 냉각기를 거친 공기의 온도는 80°C로 일정하게 유지하도록 모델링 하였다. 냉각에 의한 습도 변화를 고려하기 위해 수증기의 포화증기압을 이용하여 건공기와 습증기의 공급 유량 및 압력을 계산하였다.

2.3 가습조절 장치 모델

Cathode 에 들어가는 공급 공기의 습도는 연료전지 스택의 성능과 효율 면에서 중요한 성능 인자이다. 고분자 전해질 막의 수분 함유량에 의해 이온전도도가 변화하기 때문이다. 일반적으로 높은 전류밀도에서는 anode 가 건조해지고, 낮은 전류밀도에서는 cathode 가 건조해지므로 반응

기체 공급 시 가습기를 통해 수분을 공급해준다. 가습기에서 공급해 주는 수분의 양은 식(4)를 이용하여 냉각기 출구의 건, 습공기의 유량 (\dot{m}_{dry-a} , \dot{m}_{v-cl})과 압력 값(P_{dry-a})을 통해 요구 습도량(ϕ^{dea})을 일정하게 유지하며 수증기가 공급되도록 모델링 하였다.

$$\dot{m}_{Injcted-v} = \frac{M_v \phi^{des} P_{sat}(T_{cl})}{M_{dry-a} P_{dry-a}} \dot{m}_{dry-a} - \dot{m}_{v-cl} \quad (4)$$

2.4 스택 모델

연료전지 스택 모델에서는 활성화 분극, 저항 분극, 농도 분극에 의한 전압 손실에 의한 강하를 식(5)의 함수식으로 표현하였다.³⁻⁴⁾

$$V_{fc} = f(P_{O_2}, P_{H_2}, P_{sat}, T_{fc}, \phi_{ca}, I) \quad (5)$$

Cathode 로 들어가는 산소 분압(P_{O_2})은 가습기를 지난 건공기의 유량을 통해 이상기체 상태 방정식으로 정해지며, 질소 분압과 수증기 분압의 총 합으로 Cathode 압력을 얻는다. Anode 에 작용하는 수소 분압(P_{H_2})은 스택에서의 수소 연료 사용량($\mu_f=0.95$, 수소 재순환 적용)를 고려하여 수소 공급 유량을 통해 구한다. 또한 스택의 작동 온도(T_{fc})는 80°C로 일정하게 가정하고 이를 통해 포화 수증기압(P_{sat})이 정해진다. 스택의 기본적인 구성은 단위 셀의 적층 수 360개, 셀 면적 295cm² 으로 차량 탑재가 가능한 80 kW (107마력)급으로 모델링 하였다.

3. 연료전지시스템 동특성

위의 모델을 통해 스택 전압(V_{fc})을 얻기 위해서 Fig 4에서와 같이 시간에 따른 스택 전류(I) 변화량을 입력 변수로 정한다. 스택의 전류는 시스템의 요구 출력량을 의미한다. 스택 효율(η_{Stack})과 시스템 순효율($\eta_{Net-Stack}$)을 식(6),(7)와 같이 정의하였다.⁵⁾

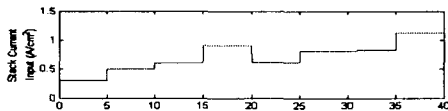


Fig. 4 Input step changes in stack current

$$\eta_{Stack} = \mu_f \cdot \frac{V_c}{1.48} \quad (6)$$

$$\eta_{Net-System} = \frac{P_{st} - P_{aux}}{m_{H_2} \cdot HHV_{H_2}} \quad (7)$$

스택 전류에 따른 시스템 요구 출력량을 만족시키기 위해서 압축기를 구동시키기 위한 모터 입력 전압과 공급 공기 유량, 압축기 소모 동력을 Fig.5 에 나타냈다. λ_{O_2} (lambda-oxygen)는 식(8)에서와 같이 스택에 공급하는 산소의 양과 실제 반응에 사용된 산소량의 비로 정의한다. λ_{O_2} 값이 증가할수록 스택에 필요 이상의 산소가 공급되고 있는 상태이고, 이는 압축기 소모 동력을 증가시킨다. 따라서 시스템 순효율의 저하가 불가피하게 되므로 최적의 λ_{O_2} 값을 통해 시스템의 출력을 만족시키며 효율이 최대가 되도록 제어한다.

$$\lambda_{O_2} = \frac{m_{O_2,Supply}}{m_{O_2,Reacted}} \quad (8)$$

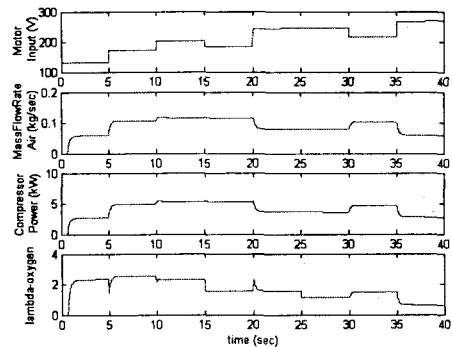


Fig. 5 Simulation results of transient response fuel cell system model ($\lambda_{O_2}=2$, $T_{atm}=25^\circ\text{C}$, $P_{atm}=1\text{atm}$)

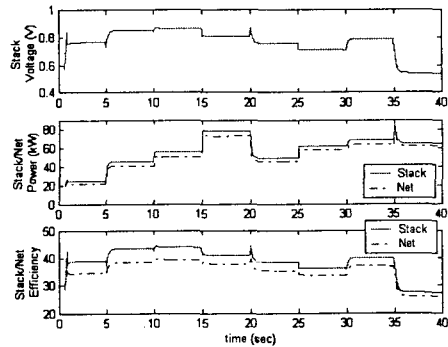


Fig. 6 Simulation result of stack/net system performance ($\lambda_{O_2}=2$, $T_{st}=80^\circ\text{C}$, $RH=100\%$)

Fig.6은 서브 시스템의 소모 동력을 고려하지 않은 스택 출력(P_{st})과 효율, 압축기와 가습기의 소모 동력을 고려한 시스템(Net system)의 순출력과 순효율을 각각 나타낸 것이다. 급격한 요구 출력 증가(5초)는 cathode로의 공급 산소량에 비해 스택에서의 산소 반응량의 증가로 인해 λ_{O_2} 값이 낮아지고 있으며, 요구 출력의 급격한 감소(20초)는 전 스택의 공급 산소량과 현 스택의 공

급 산소량의 상대적 차이와 스택의 산소 반응량의 감소에 의한 것으로 λ_{O_2} 값과 스택 전압의 과도 특성을 해석할 수 있다.

요구 습도량($\phi^{des}=50\%, 100\%, 150\%$)을 변화시키며, cathode 압력과 스택 효율의 변화를 도시하면 Fig.7과 같다. 가습량에 가장 민감한 성능 인자는 cathode에 작용하는 압력으로 스택 전압 손실에 직접적인 영향을 미친다. 저출력 영역(0-5 초)에서는 습도에 따른 효율 변화가 크며, 이는 낮은 전류 밀도에서 cathode의 건조 현상이 두드러지는 현상에 의한 것이다. 고출력 영역(15-20 초)으로 갈수록 효율의 변화가 크지 않으므로, 고출력 영역에서 가습의 양을 줄이므로 서브시스템의 소모 동력을 줄이도록 한다. 전체적으로 습도에 의한 스택 효율의 저하는 크지 않은 것으로 보이나 이는 플래딩 현상과 극에서의 건조 현상에 대한 모델링 부재에 기인한다.

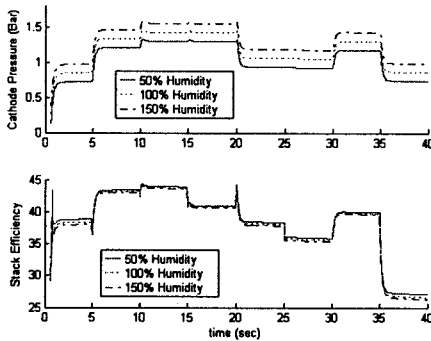


Fig. 7 Simulation result of stack efficiency & cathode pressure ($T_{st}=80^{\circ}C$, fuel util.coeff=0.95, oxygen util.coeff=0.5)

Cathode 압력을 1bar에서 4bar 까지 증가시키며, 스택의 정적 상태에서의 전압-전류 특성 곡선(V-I curve)을 얻고 그 위에 요구 출력에 따른 스택의 전압 작동점을 도시하면 Fig.8과 같다.

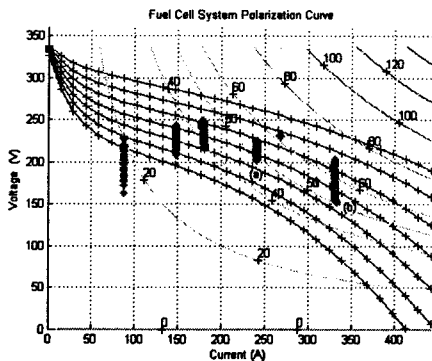


Fig. 8 Fuel cell operating point with polarization curve(V-I)

높은 전류 밀도 영역($1-1.3A/cm^2$, 35-40 초)에서 단위 셀의 전압이 0.55V이상에서 작동하고 있음을 알 수 있다. 그러나 전체 시스템 효율은 25%로 매우 낮다. 반면에 같은 출력의 $0.8A/cm^2$ 영역(25-30초)의 작동점에서는 34%의 효율을 얻을 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 차량 장착이 가능한 연료전지 시스템을 Matlab/Simulink 를 이용하여 모델링 하였으며, 이를 통해 시스템의 성능 인자 분석과 동적 거동 특성을 해석하였다.

References

- [1] James Larminie, Andrew Dicks, "Fuel Cell Systems Explained", John Wiley & Sons, 2000.
- [2] Jay T Pukrushpan, Huei Peng, "Simulation and analysis of transient fuel cell system performance based on a dynamic reactant flow model", ASME IMECE'02, pp3-4, 2002.
- [3] Hyunchul Ju, Chao-Yang Wang, "Experimental validation of a PEM fuel cell model by current distribution data", Journal of the electrochemical society, A1954, 2002.
- [4] Jay T. Pukrushpan, Anna G. Stefanopoulou, "Modeling and control for PEM fuel cell stack system", AACC, 2002, pp3119-3120.
- [5] A. Wiartalla, S. Pischinger, "Compressor expander units for fuel cell systems", SAE paper, 2000.