

다변수 최적화 기법을 이용한 자동차용 고분자전해질형 연료전지 시스템 모델링에 관한 연구

김 한상¹⁾, 민 경덕¹⁾, 전 순일²⁾, 김 수환²⁾, 임 태원²⁾, 박 진호³⁾

A Study of Modeling PEM Fuel Cell System Using Multi-Variable Optimization Technique for Automotive Applications

Han-Sang Kim, Kyoungdoug Min, Soonil Jeon, Soo-Whan Kim, Tae-Won Lim, Jinho Park

Key words : PEM fuel cell(고분자전해질형 연료전지), Stack(스택), BOP(주변 장치), Multi-variable optimization(다변수 최적화), Vehicle simulation(차량 시뮬레이션)

Abstract : This study presents the integrated modeling approach to simulate the proton exchange membrane (PEM) fuel cell system for vehicle application. The fuel cell system consisting of stack and balance of plant (BOP) was simulated with MATLAB/Simulink environment to estimate the maximum system power and investigate the effect of BOP component sizing on system performance and efficiency. The PEM fuel cell stack model was established by using a semi-empirical modeling. To maximize the net efficiency of fuel cell system, multi-variable optimization code was adopted. Using this method, the optimized operating values were obtained according to various system net power levels. The fuel cell model established was co-linked to AVL CRUISE, a vehicle simulation package. Through the vehicle simulation software, the fuel economy of fuel cell powered electric vehicle for two types of driving cycles was presented and compared. It is expected that this study can be effectively employed in the basic BOP component sizing and in establishing system operation map with respect to net power level of fuel cell system.

1. 서 론

최근 전세계적으로 환경 오염에 대한 관심이 크게 대두되면서 자동차 배기가스 배출물을 근본적으로 저감하기 위한 노력이 각국 선진 자동차 회사들 간에 적극적으로 진행되고 있다. 그러나, 기존의 내연기관으로는 보다 엄격해지는 CO₂ 및 각종 유해 배출물 규제에 대응하기에는 근본적인 한계가 있는 실정이다. 따라서, 대다수의 자동차 회사에서는 CO₂ 배출을 근본적으로 줄이고, 파워 트레인의 효율을 향상시킬 수 있는 대안으로 연료전지 자동차에 대한 개발을 위해 적극적으로 진행하고 있다. 연료전지는 전기화학적 반응을 통하여 연료의 반응 Gibbs 에너지를 전기로 직접 변환하여 직류 전기를 생산하는 장치로 기존 에너지원보다 효율이 높으며 유해 배출물이 거의 없어 미래의 자동차 동력원으로 각광받고 있다. 여러 연료전지 형태 중 고분자전해질형 연료전지(Proton Exchange Membrane Fuel Cell)는 낮

은 작동 온도 (100°C 미만), 높은 출력 밀도 및 부하 변동에 따른 빠른 응답성, 모듈화 및 안전성이 우수한 특성 등으로 인해 자동차의 동력원으로 적용되기에 가장 적합한 것으로 평가받고 있다. 국내외적으로 고분자전해질형 연료전지에 대한 연구는 대개 재료 및 전기화학적 접근을 통한 단위 연료전지의 전해질막과 촉매층의 성능 및 효율 향상을 위한 실험적 연구 개발에 집중되어 진행되어 왔다. 그렇지만 자동차에 고분자전해질형 연료전지를 적용하기 위해서는 연료전지 스택 자체뿐만 아니라 스택의 효율적인 운전을 위한 열,

1) 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : hsk007@plaza.snu.ac.kr

Tel : (02)874-6539 Fax : (02)874-2001

2) 현대자동차 환경기술연구소 연료전지시스템개발팀

E-mail :

Tel : Fax :

3) (주) 엔지비

E-mail :

Tel : Fax :

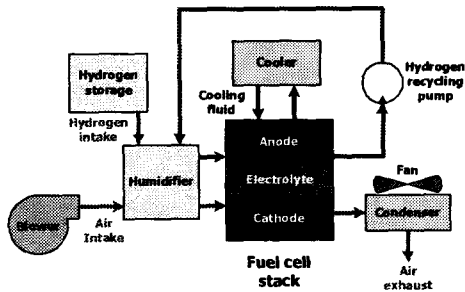
유체, 열전달, 물질 전달 현상 등을 포함하는 주변 장치(BOP, Balance of Plant)를 포함한 연료전지 시스템이 구성되어야 하며 이에 대한 체계적인 분석 및 시스템 성능 최적화를 위한 연구가 필수적이다.^{1)~8)}

본 연구에서는 자동차용 연료전지 시스템 해석을 위해 필요한 스택과 그 주변 장치를 MATLAB/Simulink로 모델링하고, 다변수 최적화 기법을 적용하여 시스템 구동 시 요구되는 출력 조건에 따른 공기극 압력 및 습도 등 작동 주요 변수를 최적화할 수 있는 기법을 제시하였고, 이를 차량 시뮬레이션과 연계, 수행하여 연료전지 시스템의 중요 변수 및 주변 장치 사양 변화에 따른 연료전지 자동차의 연비 및 동력 소모 특성을 고찰하여 연료전지 자동차 통합 시뮬레이션 구현을 위한 기초 가능성을 제시하였다.

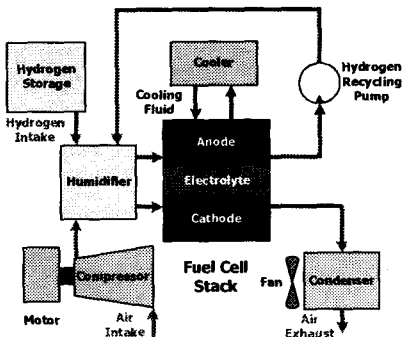
2. 연료전지 시스템 모델링

2.1 고분자 전해질형 단위 연료전지

Fig. 1은 본 연구에 적용된 상압형과 가압형 연료전지 시스템을 나타낸 것이다. 상압형 시스템의 경우, 공기 공급 장치로 블로워를 적용하는 반면, 가압형 시스템의 경우는 압축기를 주로 사용하는 것이 주요 차이점이다.



a) low-pressure operating fuel cell system



b) high-pressure operating fuel cell system

Fig. 1 Schematic diagram of operating fuel cell system for automotive applications

2.2 스택 모델링

본 연구에서는 기존 연구에서 제시된 연료전지 모델을 사용하여 단위 연료전지(unit cell)를 모델링한 후 이를 적층하여 스택 모델을 구성하였다.⁵⁾ 모델링된 단위 셀 하나의 면적을 기준으로 스택은 이를 적층하여 평균 최대 순출력 80 kW를 만족하도록 구성하였다. 스택 모델에서는 스택의 온도와 공급 기체의 압력 및 습도 조건에 따라 전압과 전류 밀도 및 출력을 계산한다. 이 때 스택 공기극에는 공기를 공급하고, 수소극 쪽에는 수소 탱크에서 수소를 공급하는 것으로 생각하였다. 공기와 수소는 당량 조건보다 각각 2배와 1.2배로 공급하였다. 스택에서 사용되지 않은 수소는 수소 재순환용 펌프를 통하여 재순환되도록 하였다.

2.3 주변 장치 모델링

공기 공급 장치로는 상압형 시스템의 경우는 Turbomix 블로워와 원심(centrifugal) 블로워를 적용하였고, 가압형 시스템의 경우는 스크류 압축기와 Roots 블로워를 적용하였다. 관련 공급 장치의 효율은 각각의 성능 선도를 look-up table로 작성하여 모델링하였다. 압축기의 구동을 위한 모터의 효율은 85%로 일정한 것으로 가정하였다.

고분자 전해질형 연료전지의 경우, 전해질의 수소 이온 전도도는 공급 기체의 상대 습도와 밀접한 관련이 있으므로, 스택에 공급되는 기체의 상대 습도를 조절해 주어야만 한다.²⁾ 연료전지에 공급되는 기체는 1차적으로 Fig. 1과 같이 스택에서 빠져나오는 고온 다습한 공기를 통하여 습도를 일정 수준으로 높여준 후 부족한 수분은 인젝션 타입의 습도 조절 장치를 통하여 조절해 주는 것으로 하였다.³⁾

스택 냉각을 위한 냉각관은 단위 셀 3개 당 하나가 존재하는 것으로 생각하여 스택의 온도 조절과 냉각 펌프 용량 결정을 위해 냉각수 유량과 냉각관에서 발생하는 압력 강하를 계산하였다. 이를 위해 냉각 장치에서 발생한 열량을 모두 냉각수가 흡수하는 것으로 가정하였다. 냉각수 펌프의 효율은 70%로 일정하다고 가정하였다.

3. 시스템 해석 결과

3.1 스택 온도 및 공기 공급 압력의 영향

Fig. 3은 스택 작동 온도에 따른 단위 연료전지의 성능을 나타낸 것이다. 공급 기체의 경우, 상대 습도 100%이고 압력은 1.5 bar에서의 결과이다. 스택 작동 온도가 증가함에 따라 연료전지 성능은 개선됨을 알 수 있다. 그렇지만, 스택 온도가 증가함에 따라 습도를 유지하기 위해 가습 요구

량의 증가로 인해 가습기에서 소모되는 동력이 증가하므로 시스템 효율 차원에서의 최적화 고려가 필요하다. Fig. 4는 스택 온도를 일정하게 유지한 상태에서 공급 공기 압력을 변화시키면서 단위 연료전지 성능을 분석한 것이다. 공기극 압력을 증가시킬 경우 단위 전지의 성능이 크게 개선된다. 가압형 시스템에서는 공급 공기 압력을 압축기를 통하여 증가시킬 수 있으므로 동일한 크기의 스택에서 보다 많은 출력을 뽑아내는 것이 가능하다.

3.2 다변수 최적화 기법의 적용

앞 절에서 제시된 바와 같이 연료전지의 성능은 스택 온도, 공급 가스의 압력, 상대 습도 등 많은 물리적 변수에 의하여 크게 영향을 받는다. 더욱이 연료전지 시스템의 성능 및 효율은 스택 뿐 아니라 주변 장치의 성능 및 작동 효율에 의해서도 크게 좌우되므로, 최적화된 시스템을 구현하기 위해서는 스택 및 주변 장치를 모두 고려한 다변수 최적화 연구가 필수적이다.

본 연구에서는 다변수 최적화 프로그램을 적용하여 시스템 순효율이 최대화되는 연료전지 시스템의 최적 입력 파라미터를 산출하였다. 실제의 연료전지 시스템 특성을 자세하게 고려하기 위해서는 많은 수의 변수들을 대상으로 한 다변수 최적화를 수행하여야 한다.

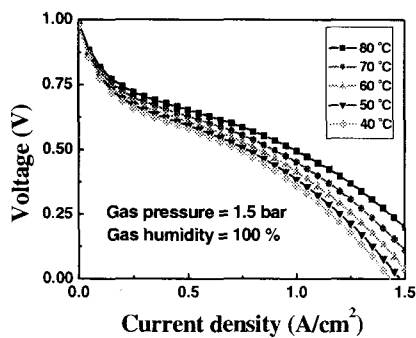


Fig. 3 Polarization curves at different stack temperatures

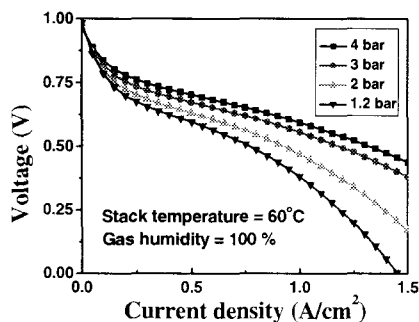


Fig. 4 Polarization curves at different inlet air pressures

그렇지만, 다변수 최적화의 가능성을 우선 제시하고 확인해 보기 위하여 여기서는 입력 변수로는 시스템 순출력과 스택 온도의 2가지를 이용하였다. 출력값은 공기극 및 수소극의 상대 습도, 공기극 압력으로 하였다.

Fig. 5는 Turbomix 블로워 모델의 공기 공급 장치를 적용한 경우 시스템 순출력 50 kW, 스택 온도 60°C에서 다변수 최적화를 이용한 공급 기체 습도의 최적화 결과를 나타낸다. 공기 및 수소의 상대 습도 최적값이 나타나 있다. 이와 같은 방법을 이용하면 다양한 연료전지 시스템의 작동 조건에 따른 상대 습도, 공급 가스 압력 등 주요 작동 변수들의 최적값을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

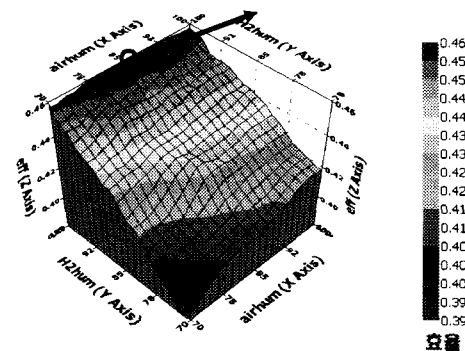


Fig. 5 Simulated results of input operating parameters by multi-variable optimization technique

3.3 차량 시뮬레이션과의 연계 결과

연료전지 시스템을 차량에 적용하는 경우, 연료전지 시스템의 효율이 차량의 가속 성능 및 연비 등 주요 평가 인자에 어떤 영향을 미치는지를 파악하는 것은 매우 중요한 과제이다. 본 연구에서는 연료전지 시스템 모델과 다변수 최적화 방법을 적용하여 얻어진 최적화 결과를 차량 시뮬레이션 프로그램에 적용하여 연료전지 자동차의 연비를 계산해 보았다.

차량 시뮬레이션 코드로는 AVL사의 CRUISE를 적용하였다. CRUISE의 경우, 다양한 종류의 차량에 대한 모델링을 통하여 차량의 성능 및 효율 등을 예측, 평가할 수 있는 기능을 제공하는 상용 코드이다.

MATLAB/Simulink를 이용한 연료전지 모델에서 CRUISE의 차량 모델로 다변수 최적화를 포함해 얻어진 전류값을 전달하면 차량 주행 시뮬레이션을 수행하게 되고, 여기서 전압과 로드 시그널을 연료전지 시스템으로 전달하게 된다. 차량 시뮬레이션에 의한 연비 계산은 도심 주행 사이

클(UDDS)과 고속 주행 사이클(Highway)의 2 종류의 주행 모드를 적용하여 수행되었다.

Table 1은 본 연구에 적용된 4가지 공기 공급 시스템에 대한 각 주행 모드에서의 평균 소모 동력을 나타낸 것이다. 공기 공급 시스템의 종류보다는 주행 모드에 따라 소모 동력이 크게 좌우됨을 알 수 있다. 이는 주행 모드의 종류에 따라 차속과 요구 출력이 크게 바뀌므로 이에 따른 공기 공급 장치의 작동점 변경에 따른 작동 변수의 변화가 보다 큰 영향을 미침을 나타낸다.

Table 2는 스크류 압축기를 적용한 경우, 스택 적층 수에 따른 차량 시뮬레이션을 통한 연비 결과를 나타낸 것이다. 스택 적층 수를 450개에서 500개로 증가시킨 경우 2개의 작동 모드에서 연비를 비교할 때, 스택 적층 수가 증가한 경우가 오히려 연비가 악화됨을 알 수 있다. 이는 스택 적층 수 증가에 따른 성능 개선 효과에 비하여 연료전지 시스템의 무게 증가에 따른 연비 감소 요인이 더 크게 작용한 때문으로 이해할 수 있다.

Table 1. Consumed power for four types of air supplying systems

	Power (kW)	
	UDDS	Highway
Screw compressor	6.48	19.6
Roots blower	6.61	19.8
Turbomix blower	6.67	20
Centrifugal blower	6.69	20.1

Table 2. Comparison of fuel economy according to number of stacked cells

No. of stacked cells	450	500
UDDS (km/l)	23.21	23.57
Highway (km/l)	16.96	17.25
Weight (kg)	1554	1570

4. 결론

본 연구에서는 자동차용 고분자전해질형 연료전지 시스템에 대한 다변수 최적화를 적용한 통합 시뮬레이션을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 연료전지 주변 장치를 포함한 상압형 및 가압형 시스템을 MATLAB/Simulink를 이용하여 모델링하여 주요 작동 변수들이 시스템 성능에 미치는 영향을 분석하였다.

(2) 연료전지 시스템 모델링 결과를 차량 시뮬레이션과 연계하여 연료전지 시스템의 공기 공급 장치 등 각 사양의 변경에 따른 연료전지 자동차

의 연비 및 각 장치의 소모 동력 등을 예측할 수 있는 기초를 마련하였다.

(3) 다변수 최적화 기법을 이용하여 연료전지 시스템의 작동 변수를 최적화하고, 이를 차량 시뮬레이션에 적용하여 초기 단계의 차량용 연료전지 통합 시뮬레이션 방안을 제시하였다. 이는 연료전지 자동차 차량 통합 시뮬레이션의 기초가 될 것으로 기대된다.

References

- [1] James Larminie and Andrew Dicks, Fuel Cell System Explained, John Wiley & Sons, 2000.
- [2] James Howard Lee, "A Methodology for the Development of Mathematical Models for Simulation and Design of Fuel Cell Stacks", Ph. D. Thesis, Texas A&M University, 1996.
- [3] A. Wiartalla, S. Pischinger, W. Bornscheuer, K. Fierweger and J. Ogrzewalla, "Compressor Expander Units for Fuel Cell Systems", SAE paper No. 2000-01-0380, 2000.
- [4] T. E. Springer, T. A. Zawodzinski, and S. Gottesfeld, "Polymer Electrolyte Fuel Cell Model", Journal of The Electrochemical Society, Vol. 138, No. 8, pp. 2334-2342, 1991.
- [5] Jay Taewee Pukrushpan, "Modeling and Control of the Fuel Cell Systems and Fuel Processors", Ph. D. Thesis, University of Michigan, 2003.
- [6] T. E. Springer, M. S. Wilson, and S. Gottesfeld, "Modeling and Experimental Diagnostics in Polymer Electrolyte Fuel Cells", Journal of The Electrochemical Society, Vol. 140, No. 12, pp. 3513-3526, 1993.
- [7] D. Chu, R. Jiand, and C. Walker, "Analysis of PEM Fuel Cell Stacks using an Empirical Current-Voltage Equation", Journal of Applied Electrochemistry, Vol. 30, pp. 365-370, 2000.
- [8] Trung V. Nguyen and R.alph E. White, "A Water and Heat Management Model for Proton-Exchange-Membrane Fuel Cells", Journal of The Electrochemical Society, Vol. 140, No. 8, pp. 2178-2186, 1993.