

4kW급 연료전지 하이브리드 자동차 개발을 위한 시스템 동특성 연구

이 동을¹⁾, 박 광진²⁾, 배중면³⁾, 정재화, 지현진

Study on system dynamic behaviors for 4kW-class fuel cell hybrid vehicle

Dong-ryul Lee, Kwangjin Park, Joongmyeon Bae, Jaehaw Jeong, Hyunjin Ji

Key words : PEMFC(고분자 전해질 연료전지), hybrid vehicle(하이브리드 자동차), system dynamic behavior(시스템 동적 거동), Control strategy(제어전략)

Abstract : PEMFC(proton exchange membrane fuel cell) is most applicable to automobile in various types of fuel cell. However, to improve system dynamics and long term performance fuel cell is supported by auxiliary power unit forming hybrid system. The operating strategy of hybrid system influences on efficiency and stability. In this paper the proper strategies are compared each other considering power distribution and stable system operation. The chosen strategy is simulated by MATLAB simulink to forecast realization of fuel cell hybrid vehicle.

1. 서 론

PEMFC(proton exchange membrane fuel cell)는 높은 효율과 빠른 시동성으로 인해 전기자동차의 주 동력원으로 각광받고 있다. 하지만 열 관리와 불안정한 장기 운전 특성등의 문제로 적용에 어려움을 겪고 있다. 특히 운전 중 발생하는 물 관리문제는 PEMFC의 동적 성능 저하의 원인이 되기도 한다.

PEMFC의 물 관리는 가습, 전해질 내 물 이동, 양극에서의 물 생성, 물 제거등을 고려하여 이루어진다. 가습과 전해질 내 물 이동은 이온 전도도, 활성화 과전위(activation overpotential), 농도차 과전위(concentration overpotential)변화의 원인이 된다.^[1] 물 제거 문제는 GDL(gas diffusion layer)내의 플러딩의 원인이 되기도 한다. 플러딩은 GDL의 확산계수(diffusivity)를 저하시켜 농도차 과전위가 급격히 증가하는 원인이 된다. 또한 연료의 확산저하로 인해 PEMFC의 동적 성능이 저하되기도 한다.^[2] 따라서 물 관리 문제는 PEMFC의 동적 성능 향상을 위해 반드시 해결되어야 할 문제이다.

앞서 언급한 PEMFC의 동적 성능은 보조 동력원을 함께 이용하는 하이브리드 시스템을 통해 보완 되고 있다.^[3] 본 논문에서는 연료전지 하이브리드 자동차 개발을 위해 연료전지-슈퍼캐패시터 시스템의 제어전략에 따른 동특성 연구가 수행되었다. 또한 자동차 개발에 앞서 시뮬레이터를 통해 추구하고자 하는 제어전략의 가능성을 가늠해 보았다.

2. 연료전지 하이브리드 시스템

2.1 실험 장치 및 실험 조건

하이브리드 시스템은 크게 연료전지 및 BOP

-
- 1) 한국과학기술원, 기계공학과
E-mail : beautyfinder@kaist.ac.kr
Tel : (042) 869-3085 Fax : (042) 869-8207
 - 2) 한국과학기술원, 기계공학과
E-mail : ydmj79@kaist.ac.kr
Tel : (042) 869-3085 Fax : (042) 869-8207
 - 3) 한국과학기술원, 기계공학과
E-mail : jmbae@kaist.ac.kr
Tel : (042) 869-3085 Fax : (042) 869-8207

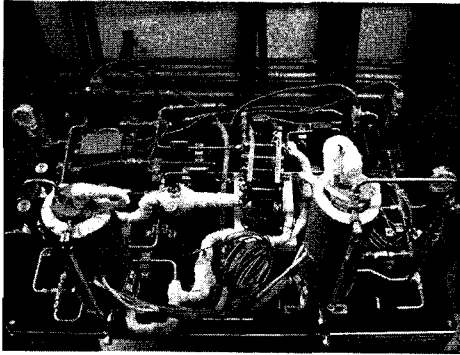


Fig. 1 PEMFC stack and BOP

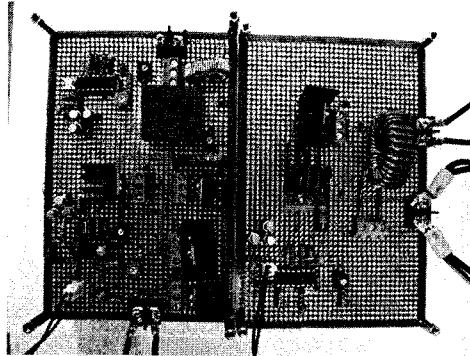


Fig. 2 DC/DC converter

(balance of plant), 보조동력원, 컨버터로 구성된다. 보조 동력원은 Nesscap 사의 400F 슈퍼캐패시터를 이용하였다. 총 6개가 사용 되었으며, 전체 용량은 227F이다. 컨버터는 연료전지와 슈퍼 캐패시터에서 발생하는 전압을 12V로 승압하여 유지시키는 부스트 컨버터와 연료전지의 잉여 전력을 슈퍼 캐패시터로 충전하는 벡 컨버터로 구성되었다.

연료전지는 Cool-FC 사의 Pro-FC7을 이용하였다. MEA(membrane electrode assembly)의 반응면적은 50cm²이고 7장이 스택으로 구성되어 있다. 연료극(anode)에는 순도 99.9%의 수소가 MFC(mass flow controller)를 통해 당량비(stoichiometry)가 1.5로 유지하도록 공급되었다. 공기극은 순수한 산소 대신 공기가 공급되었으며, 공급량은 스택의 특성상 입출구 압력을 제어하여 조절 되었다. 가습은 수소와 공기가 버블러를 지나면서 이루어 졌다. 잔류가스 및 물은 실험 전후 약 3분간의 질소 퍼징으로 제거되었다.

2.2 하이브리드 시스템 운전 전략

하이브리드 시스템의 동특성을 파악하기 위해 전류 모드를 평균전력구간과 충전구간 및 고전류구간으로 나누었다. 충전은 연료전지 전압이 4V 이상이고 슈퍼 캐패시터의 전압이 6.2V 이하일때 이루어지도록 하였다. 연료전지 전압이 4V이하

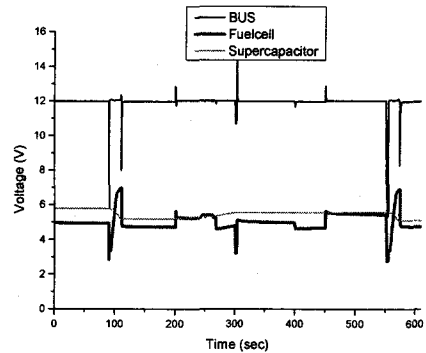


Fig. 3 Experimental results of DC BUS voltage, supercapacitor voltage, and fuel cell voltage according to load BUS current based on strategy 1

면 컨버터 전압이 불안정해지고, 슈퍼 캐패시터 전압이 6.2V이상이면 연료전지의 부하가 50W 이상이 되어 연료전지 전압이 4V이하가 될 가능성이 있어 이와 같은 충전 조건이 필요하다.

하이브리드 시스템의 제어 전략은 고전류 영역에서 연료전지와 슈퍼 캐패시터의 동력 분배에 따라 구분되었다. 제어 전략 1에서는 고전류 영역에서 연료전지와 슈퍼 캐패시터가 함께 전력을 분담한다. 하지만 제어 전략 2에서는 고전류 영역에서 슈퍼 캐패시터만 전력을 분담하였다.

Fig.3과 4는 각각 적용된 부하변동에 따라 제어 전략 1과 2에 의한 출력전압을 나타낸다. 제어 전략 1에 비해 제어 전략 2는 고전류에서 저전류로 바뀌는 시점(200초, 450초)에서 컨버터의 버스 전압이 비교적 안정적이다. 이는 고전류 영역에서 연료전지의 전력생산이 중단되어 공기에 의한 물체가가 향상되는 제어 전략 2가 보다 안정적인 시스템 운전에 도움이 됨을 반증하는 결과라 할 수 있다.^[4] 뿐만 아니라 연료전지가 플러딩이 일어날 가능성이 있는 고전류 영역에서 운전이 되

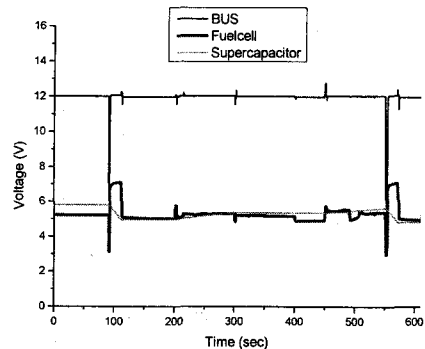


Fig. 4 Experimental results of DC BUS voltage, supercapacitor voltage, and fuel cell voltage according to load BUS current based on strategy 2

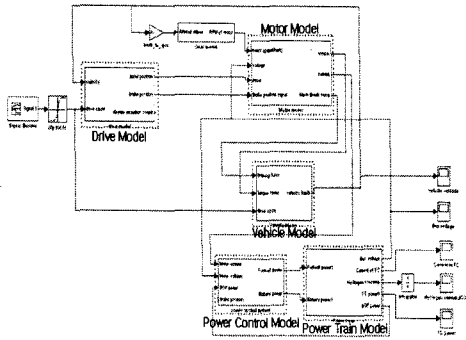


Fig. 5 Matlab simulink model

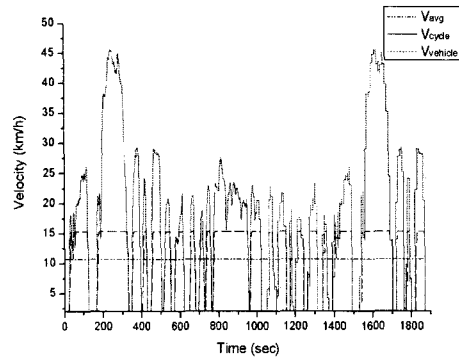


Fig. 6 Vehicle velocity

지 않기 때문에 생성된 물의 양도 제어전략 2에서 더 적을 것이다. 이를 통해 PEMFC의 효율적인 물관리가 안정적인 하이브리드 시스템 운전에도 도움이 됨을 확인할 수 있다.

3. 연료전지 하이브리드 자동차 모델링

3.1 하이브리드 자동차 운전 전략

앞서 연료전지 하이브리드 시스템의 제어전략이 따라 출력의 안정성에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 하지만 4kW 하이브리드 시스템을 구성하기 위해서 제어전략은 수정이 불가피하다. 먼저 보조동력원으로 이용되었던 슈퍼캐패시터는 전력밀도가 낮아 4kW 시스템에 적용시키기 어렵기 때문에 보조 동력원은 배터리로 대체하기로 하였다. 또한 제어전략 1과 2에 따른 시스템 출력을 고려하여 연료전지는 2kW의 일정한 출력을 부담하고, 나머지 전력은 배터리가 생성하도록 하였다. 이는 동특성이 비교적 느린 연료전지가 일정한 출력을 담당하도록 하여, 전체 시스템의 출력이 균일하게 생성되도록 하기 위한 운전 전략이다. 전체 요구 출력이 2kW 이하인 경우 연료전지의 잉여 전력이 배터리로 충전되도록 하였다. 본장에서 구성된 시뮬레이터는 이러한 수정사항을 반영하였다.

3.2 하이브리드 자동차 모델링

Fig.5은 Matlab simulink를 이용하여 연료전지 하이브리드 자동차를 모델링한 것이다. 입력은 FTP 75 주행사이클 속도의 1/2배를 사용하였다. Drive model은 입력으로 주어진 속도와 자동차의 속도를 비교하여 가속 혹은 감속을 결정하며 motor model은 결정된 가, 감속 신호와 자동차의 속도 신호를 피드백 받아 모터의 토크 및 전류를 결정한다. Vehicle model은 자동차의 거동을 모사한 것으로 토크를 입력받아 자동차의 속도가 결정된다. Power control model은 배터리와 연료전지에서 담당해야 하는 전력을 결정하여 분배하여 준다. Power train model은 연료전지와 배터리를 모사한 것으로 power control model에서 분배된 전력을 내기위한 연료전지와 배터리의 전압과 전류를 결정하게 된다.

3.3 모델링 결과

3.3.1 차량 속도

Fig.6는 제어전략에 따라 1874초동안 연료전지 하이브리드 자동차의 속도를 모사한 결과이다. 자동차의 최대 속도는 15km/h이며 평균 속도는 10.8km/h이다. 자동차의 속도가 주행사이클의 속도를 추종하지 못하는 원인은 기어비가 14:1로 고정되어 있어 부하가 없는 상태를 가정할 때 모터가 낼 수 있는 최대 속도가 16km/h로 제한되기 때문이다. 자동차의 제원에 따른 속도 제한 구역 이외의 영역에서 요구되는 속도를 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

3.3.2 수소 소모량

Fig.7은 주행 사이클동안 소모된 수소 사용량이다. 수정된 제어전략에 따라 고전류 영역에서만 배터리에서 부하를 분담하도록 하였으며 연료전지는 2KW로 일정하게 운전하였다. 사용된 총 수소량은 31mol로 694.4ℓ가 소모되었다. 120bar 기준으로 환산하게 되면 5.8ℓ를 소모하게 되며 Driving cycle 동안 이동거리는 5.6km이므로 20ℓ 수소 탱크 1개 사용 시 최대 20.7km를 주행할 수 있게 된다.

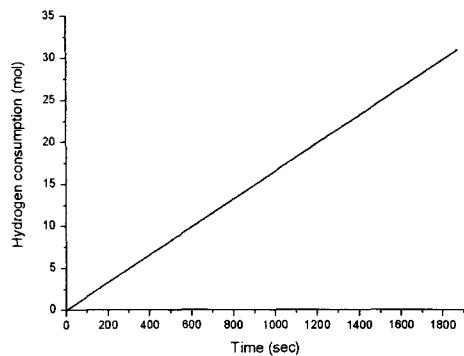


Fig. 7 Hydrogen consumption

4. 결 론

본 논문에서는 4kW 하이브리드 자동차 개발을 위해 소규모 시스템을 구성하여 실험하고, 시뮬레이터를 통한 제어전략 실현성에 대해 살펴보았다. 하이브리드 시스템의 출력 안정성은 동적특성이 비교적 느린 연료전지의 효율적 운영에 의해 결정된다. 특히 고전류 영역에서 보조동력원에서 출력을 담당하여 연료전지의 퍼징효과를 줄 수 있는 제어 전략이 안정적 시스템 운전에 효과적이었다. 하지만 4kW급 하이브리드 시스템을 구성하기 위해 연료전지는 2kW의 일정전력을 유지하고, 나머지 전력을 보조동력원이 담당하도록 제어전략을 수정하였다. 이러한 제어전략을 토대로 구성된 시뮬레이터를 통해 20ℓ 수소 탱크 1개 사용 시 최대 20.7km 주행할 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 KAIST의 기관고유사업 출연금으로 수행한 연구결과입니다.

References

- [1] Dong-ryul Lee, Joongmyeon Bae, Dewan Hasan Ahmed, 2006, "Numerical study for the effect of inlet humidity condition at PEMFC channel," J. of KSME, In press
- [2] S.Shimpalee, W.k.Lee, J.W. van Zee, H. Naseri-Neshat, 2006, "Predictin the transient response of a serpentine flow-field PEMFC", J. of power sources, 156, pp 355~368
- [3] J.N. Marie-Francoise, H. Gualous, R. Outbib, A. Berthon, 2005, "42V Power Net with supercapacitor and battery for automotive applications", J. of power sources, 143, pp 275~283
- [4] Trung Van Nguyen, Mack W. Knobbe, 2003, " A liquid water management strategy for PEM fuel cell stacks", J. of power sources, 114, pp70~79