

## 하이브리드 에너지 저장장치를 고려한 연료전지 전기자동차의 모델링 및 연료전지 출력 패턴 예측 Modeling of Fuel Cell Electric Vehicle and Estimation of Output Power Pattern of Fuel Cell Considering Hybrid Energy Storage System

---

저자 (Authors)	김동민, 김재현, 박현진, 홍정표, 임명섭, 최규성, 양현섭, 조경석 Dong-Min Kim, Jae-Hyun Kim, Hyeon-Jin Park, Jung-Pyo Hong, Myung-Seop Lim, Kyu-Sung Choi, Hyun-Sup Yang, Kyung-Seok Cho
출처 (Source)	<a href="#">한국자동차공학회 춘계학술대회</a> , 2019.5, 1190-1194(5 pages)
발행처 (Publisher)	<a href="#">한국자동차공학회</a> The Korean Society Of Automotive Engineers
URL	<a href="http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE08748054">http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE08748054</a>
APA Style	김동민, 김재현, 박현진, 홍정표, 임명섭, 최규성, 양현섭, 조경석 (2019). 하이브리드 에너지 저장장치를 고려한 연료전지 전기자동차의 모델링 및 연료전지 출력 패턴 예측. 한국자동차공학회 춘계학술대회, 1190-1194
이용정보 (Accessed)	한양대학교 166.***.168.162 2019/10/04 12:53 (KST)

---

### 저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

### Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

# 하이브리드 에너지 저장장치를 고려한 연료전지 전기자동차의 모델링 및 연료전지 출력 패턴 예측

김 동 민<sup>1)</sup> · 김 재 현<sup>1)</sup> · 박 현 진<sup>1)</sup> · 홍 정 표<sup>\*1)</sup> · 임 명 섭<sup>2)</sup> · 최 규 성<sup>3)</sup> · 양 현 섭<sup>3)</sup> · 조 경 석<sup>3)</sup>

한양대학교 미래자동차공학과<sup>1)</sup> · 영남대학교 기계공학부<sup>2)</sup> · 한온시스템 선행부품개발팀<sup>3)</sup>

## Modeling of Fuel Cell Electric Vehicle and Estimation of Output Power Pattern of Fuel Cell Considering Hybrid Energy Storage System

Dong-Min Kim<sup>1)</sup> · Jae-Hyun Kim<sup>1)</sup> · Hyeon-Jin Park<sup>1)</sup> · Jung-Pyo Hong<sup>\*1)</sup> · Myung-Seop Lim<sup>2)</sup>  
Kyu-Sung Choi<sup>3)</sup> · Hyun-Sup Yang<sup>3)</sup> · Kyung-Seok Cho<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Automotive Engineering, Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Sungdong-gu, Seoul 04763, Korea

<sup>2)</sup>School of Mechanical Engineering, Yeungnam University, 280 Daehak-ro, Gyeongsan, Gyeongbuk 38541, Korea

<sup>3)</sup>Advanced Component Team, Hanon Systems, 95 Sinilseo-ro, Daedeok-gu, Daejeon 34325, Korea

**Abstract** : Recently, the fuel cell electric vehicle (FCEV) is getting attention because of not only environmental friendly aspects but also fine dust reduction policy. Commercialization of FCEV has begun, and now the FCEV development is confronted with the goal of improving the energy efficiency of the vehicle system which can extend the driving range. To achieve the mileage improvement, the main operating region of traction motor, battery, and fuel cell should be grasped. This paper deals with the modeling of the FCEV considering hybrid energy storage system (HESS). The traction motor was reflected as the efficiency map from the finite element analysis (FEA) considering the control strategy. For the HESS which consisted of battery and fuel cell, the second order RC equivalent circuit and Dicks-Larminie model was adopted respectively. In addition, a simplified rule-based control logic was introduced and adopted in vehicle simulation. Finally, from the vehicle simulation, the output power pattern of the fuel cell was estimated.

**Key words** : Drive cycle(주행 사이클), Fuel cell electric vehicle(FCEV, 연료전지 전기자동차), Hybrid energy storage system(HESS, 하이브리드 에너지 저장장치), Lithium iron phosphate battery(LFP, 리튬철인산염 배터리), Polymer electrolyte membrane fuel cell(PEMFC, 고분자 전해질 연료전지), Vehicle modeling(차량 모델링)

## 1. 서 론

최근 연료전지 전기 자동차가 차세대 친환경 자동차로 주목을 받고 있다. 이와 더불어 주행 중 연료 전지에 산소 공급을 위해 외기를 압축하여 사용하는 특징이 있어 미세먼지저감 대책으로도 각광받고

있는 상황이다. 연료전지 전기자동차의 상용화가 진행됨에 따라 관련 연구 또한 증가하고 있다.<sup>1)</sup> 이는 10년 전에 비해 관련 연구 논문이 2배 이상 증가한 것으로부터 확인 가능하다.<sup>2)</sup> 상용화 시작에 이어 활발히 발전하기 위해서는 충전 기반 시스템 구축과 시스템 효율 향상이 필요하다.

이 중 시스템 효율 향상을 이루기 위해서는 각 구성 부품 모두 효율 향상이 필수 목표이다. 특히 주로

\* Corresponding Author, E-mail: hongjp@hanyang.ac.kr

운전되는 영역의 효율을 향상시킬 경우 에너지 효율 향상을 크게 이룰 수 있다. 이를 위해서는 주행 사이클에 대한 각 부품의 주 운전 영역 파악이 선행되어야 한다.

본 논문에서는 주행 사이클에 대한 연료전지의 주 운전 영역 파악에 대해 다루었다. 이를 위해서 먼저 하이브리드 에너지 저장 장치를 고려한 연료전지 전기자동차의 모델링을 진행하였다. 여기서 주요 구성 요소인 구동 모터, 배터리, 연료전지의 모델을 구성하였다. 다음으로는 진행된 모델링으로부터 차량 시뮬레이션을 진행하였다. 이 때 반영한 주행 조건에 대해 설명하였고 차량 시뮬레이션 진행 시 가정한 간략한 규칙 기반 제어 로직을 설명하였다. 최종적으로 시뮬레이션 결과를 정리하고 연료전지의 출력 패턴을 예측하였다.

## 2. 연료전지 전기자동차 모델링

본 섹션에서는 Fig. 1 과 같이 연료전지 전기자동차의 모델링에 대해 다룬다. 그 중 주행 성능 및 에너지 소비에 큰 영향을 주는 구동모터와 하이브리드 에너지 저장장치 모델링에 대해 자세히 설명하였다.

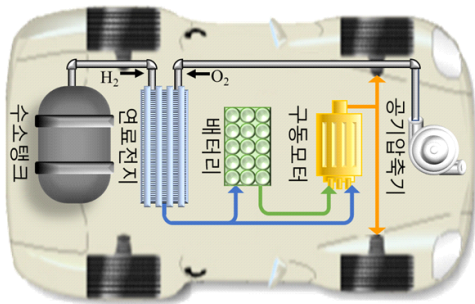


Fig. 1 연료전지 전기자동차의 구성

### 2.1 구동 모터

구동 모터는 연료전지 전기자동차의 주요 동력원이다. 따라서 차량 성능을 결정짓는 주요한 역할을 한다. 구동 모터의 대상 유형은 출력 밀도가 높은 매입형 영구자석 동기 전동기이며 유한요소해석 (finite element analysis, FEA) 모델을 Fig. 2 (a) 나타내었다. 또한 사양은 Table 1에 정리하였다.

Table 1 구동 모터의 사양

항목	값	단위
극 수 / 슬롯 수	8 / 48	-
DC link 전압	625.0	VDC
최대 출력	120.0	kW
기저 속도	4000	RPM
최대 토크	286.5	Nm
최대 속도	10000.0	RPM

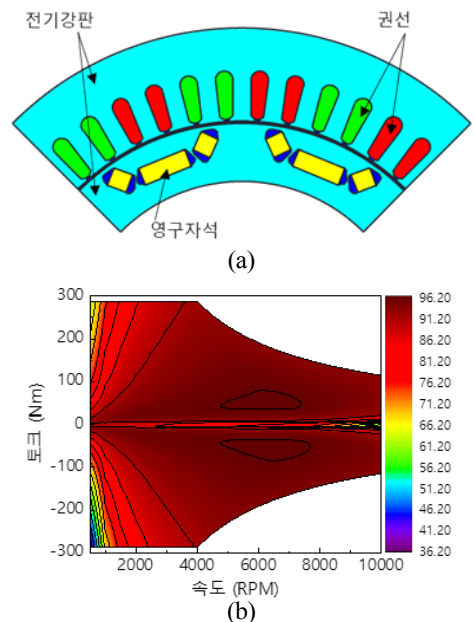


Fig. 2 구동모터의 (a) FEA 모델 및 (b) 효율 맵

구동 모터를 차량 시뮬레이션에 반영하기 위해서 Fig. 2 (b)에 도시한 효율 맵을 생성하였다. 이를 위해 2D FEA와 철손을 고려한  $d$ - $q$  축 등가회로를 이용하였다.<sup>3)</sup> 이 때, 전압 방정식은 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 부하 포인트별 전류 위상각은 최소 손실 제어 적용시의 결과를 반영하였다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 \\ 0 & R_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L_q \\ \omega L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Psi_a \end{bmatrix}$$

where  $i_{d,q}$ : current (A),  $L_{d,q}$ : inductance (H),  $v_{d,q}$ : voltage (V) for  $d, q$  axis,  $p$ : differential operator  $R_a$ : phase resistance ( $\Omega$ ),  $\omega$ : electrical angular velocity (rad/s),  $\Psi_a$ : armature linkage flux (Wb)

Table 2 배터리 사양

항목	값	단위
종류	LiFePO4	-
정격 전압	622.1	V
정격 용량	65	Ah
정격 출력	40.4	kW

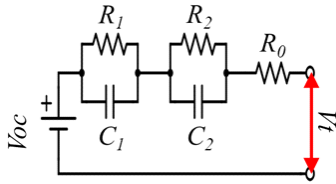


Fig. 3 배터리의 2차 RC 등가회로

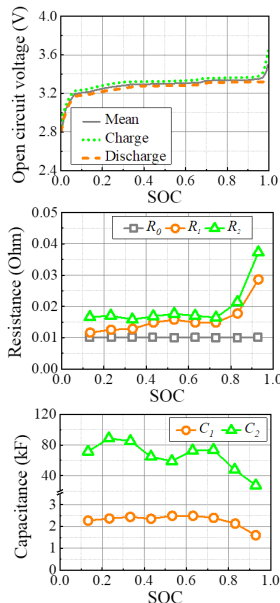


Fig. 4 배터리의 등가회로 파라미터 (주변 온도: 상온)

## 2.2 배터리

배터리는 리튬이온 배터리 중 리튬철인산염 배터리를 사용하였다. 구동 모터의 DC link 전압을 고려하여 정격 전압은 622.1 V 이며 배터리 사양을 Table 2에 정리하였다.

차량 시뮬레이션에서 사용할 모델은 Fig. 3에 나타난 2차 RC 모델을 사용하였다. 상응하는 파라미터는 배터리 한 개의 셀의 실험 결과로부터 추정되었으며 Fig. 4에 도시하였다.<sup>4)</sup>

Table 3 연료전지 사양

항목	값	단위
종류	PEMFC	-
정격 전압	625.0	V
최대 출력	120.0	kW

Table 4 연료전지 등가회로 파라미터

항목	값	단위
내부저항	0.66404	$\Omega$
셀 당 Nernst voltage	1.13420	V
셀 개수	900	-
교환 전류	0.91636	A
교환 계수	0.26402	-
타펠 경사	0.05437	V

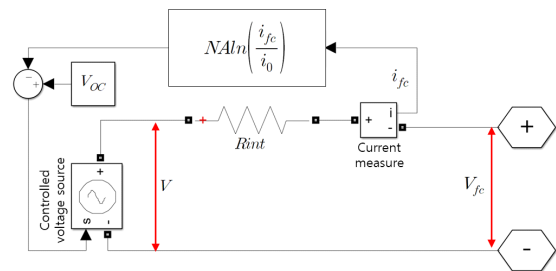


Fig. 5 연료전지 등가회로

## 2.3 연료전지

연료전지의 사양은 Table 3에 나정리하였다. 고분자 전해질 연료전지 (PEMFC)로 모델링 하였으며 정격전압은 625 V, 최대 출력은 120 kW 이다. 연료전지 역시 DC link 전압을 고려하여 결정하였다.

연료전지의 등가회로는 Fig. 5에 도시한 Dicks-Larminie 모델을 사용하였다.<sup>5), 6)</sup> (2)는 활성화 손실을 묘사한 것이고, (3)은 저항 손실을 나타낸다. 본 논문에서는 온도, 압력 및 공급 조건이 일정하다고 가정하였다.

$$V = V_{OC} - NAln\left(\frac{i_{fc}}{i_0}\right) \quad (2)$$

$$V_{fc} = V - R_{int} \cdot i_{fc} \quad (3)$$

where  $V_{OC}$ : open circuit voltage (V),  $N$ : number of cell,  $A$ : Tafel slope (V),  $i_0$ : exchange current (A),  $R_{int}$ : internal resistance ( $\Omega$ )

Table 5 차량 사양

항목	값	단위
공차중량 (배터리, 연료전지, 감속기, 구동 모터 포함)	2549	kg
폭	1.86	m
높이	1.63	m
공기저항계수	0.329	-
축거	2.79	m
무게중심 높이	0.50	m
휠 반경 (타이어 포함)	0.334	m
구름저항계수	0.01	-
감속비	6.54:1	-

### 3. 차량 시뮬레이션

차량 시뮬레이션은 기본적으로 MATLAB Simulink 기반의 ADVISOR를 이용하였다. ADVISOR에서 모터 모델과 배터리 모델을 본 논문에서 소개한 모델로 대체 하였고, 연료전지 모델 및 규칙기반 제어 로직을 추가하여 구성하였다.

#### 3.1 주행 조건

차량 시뮬레이션 진행 시 반영한 주행 조건은 차량의 사양과 주행 사이클이 있다. 차량 사양은 중형 SUV를 기준으로 선정하였으며 Table 5에 자세한 차량 사양을 나타내었다. 공차 중량의 경우 주요 부품의 무게를 반영하였다. 공기저항계수는 현대자동차 넥소를 참고하였다. 구름 저항 계수는 일반 아스팔트 노면과 승용차 사이의 계수 값의 범위 내에서 가정하였다.

다음으로 본 논문에서 반영한 주행 사이클을 Fig. 6에 나타내었다. Artemis 주행 사이클로 도심, 근교, 고속도로, 근교, 도심 순으로 구성되어 있다. 전통적으로 많이 사용되는 UDSS나 HWFET 보다 최근 차량 속도의 증가를 반영한 현실에 가까운 주행 사이클이다.

#### 3.2 제어 로직

차량 시뮬레이션을 진행하기 위하여 연료전지 전기자동차의 제어 로직을 가정하였다. Fig. 7에 나타

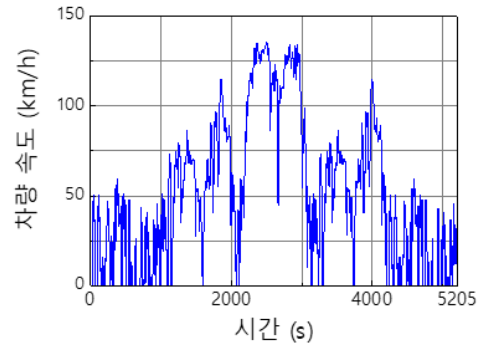


Fig. 6 Artemis 주행 사이클

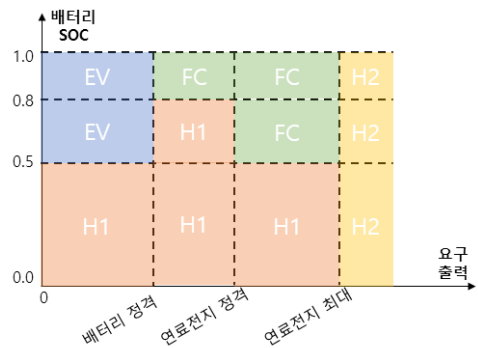


Fig. 7 간략화된 규칙 기반 제어 로직

낸 것처럼 배터리 SOC와 차량의 요구 출력을 기준으로 간략하게 규칙 기반 제어 로직을 구성하였다. EV모드의 경우 배터리만을 이용하는 경우이고, FC모드는 연료전지만을 이용하는 주행 모드이다. H1과 H2는 배터리와 연료전지를 모두 사용하는 하이브리드 모드이다. H1의 경우 연료전지가 차량 구동을 위한 에너지를 제공하는 동시에 배터리를 충전하는 모드이다. H2의 경우에는 연료전지와 배터리 모두 차량 구동을 위한 에너지를 제공하는 주행 모드이다.

### 4. 시뮬레이션 결과

차량 시뮬레이션을 앞선 모델들을 반영하여 진행하였다. 배터리 초기 SOC는 1.0 인 조건으로 진행하였다. Fig. 8에는 주행 조건 및 사이클에 대한 구동 모터의 운전 포인트를 나타내었다. 다음으로 Fig. 9에 시뮬레이션 시간 동안 배터리 SOC와 요구 출력

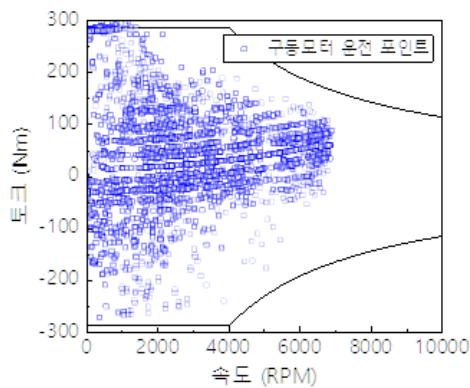


Fig. 8 구동 모터 운전 포인트

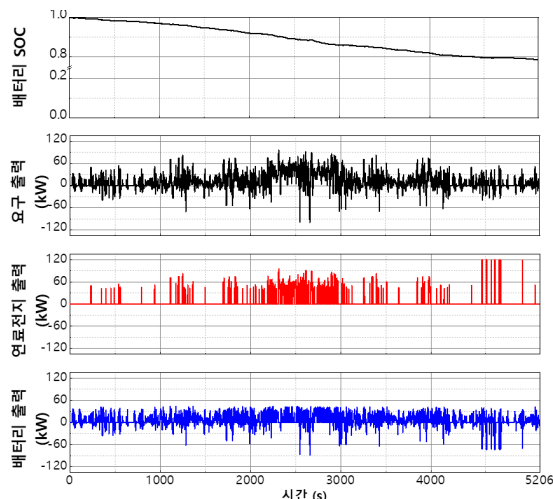


Fig. 9 배터리 SOC와 요구 출력에 따른 연료전지와 배터리 출력 분배 결과

에 대한 연료전지와 배터리의 출력을 나타내었다. 요구출력이 음수인 경우는 회생 제동 상황을 나타낸다. 배터리의 경우 출력이 음수인 경우는 충전 상황을 나타내며 앞서 설명한 회생 제동 상황이거나 H1 모드인 경우에 나타난다.

## 5. 결론

하이브리드 에너지 저장장치를 반영한 연료전지 전기 자동차의 모델링을 통하여 연료전지 출력 패턴 예측을 진행하였다. 구동모터는 2D 유한 요소 해석과 등가회로로부터 효율 맵의 형태로 반영하였으

며 배터리와 연료전지의 특성은 등가회로로 모델링하였다. 또한 대상 차량을 중형 SUV로 선정하여 모델링을 완성하였다. 이렇게 모델링 된 연료전지 전기 자동차를 Artemis 주행 사이클과 규칙 기반 제어 로직을 반영하여 차량 시뮬레이션을 진행하였다. 결과적으로 주행 사이클에 대한 연료전지의 출력 패턴을 산정 하였으며, 향후 이 패턴을 활용하여 연료전지 구성 부품의 에너지 효율 향상 설계를 진행할 수 있을 것으로 기대된다.

## Acknowledgement

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “수소연료전지차 부품실용화 및 산업기반육성사업” (과제번호 R0006468) 으로 수행된 연구결과입니다.

## References

- 1) J. Han, S. Im, and S. Yu, “Air flow trajectory and surge avoidance of centrifugal compressor under variable pressure operation of automotive fuel cells,” *International Journal of Automotive Technology*, vol. 17, no. 4, pp. 731 – 738, 2016.
- 2) *Search Term: Fuel Cell. Web of Science*, accessed on Apr. 2019.
- 3) H.-J. Kim, J.-S. Jeong, M.-H. Yoon, J.-W. Moon, and J.-P. Hong, “Simple Size Determination of Permanent-Magnet Synchronous Machines,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 10, pp. 7972 – 7983, 2017.
- 4) M. P. Klein and J. W. Park, “Current Distribution Measurements in Parallel-Connected Lithium-Ion Cylindrical Cells under Non-Uniform Temperature Conditions,” *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 164, no. 9, 2017.
- 5) S. Njaya, O. Tremblay, and L.-A. Dessaint, “A generic fuel cell model for the simulation of fuel cell vehicles,” *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2009.
- 6) J. Larminie and A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*. Place of publication not identified: John Wiley & Sons Incorporated, 2003.