Transactions of KSAE, Vol. 14, No. 5, pp.65-72 (2006)

Copyright © 2006 KSAE
1225-6382/2006/083-09

연료전지 자동차의 주행성능 예측을 위한 전기자동차 및 연료전지의 성능실험과 수학적 모델링

조 용 석[*1] · 김 득 상[2] · 안 석 종[2]

국민대학교 자동차공학전문대학원[1] · 국민대학교 기계자동차공학부[2]

Measurements and Numerical Analysis of Electric Cart and Fuel Cell to Estimate Operating Characteristic of FCEV

Yong-Seok Cho[*1] · Duk-Sang Kim[2] · Seok-jong An[2]

[1]*Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea*
[2]*Graduate School of Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea*
(Received 5 January 2006 / Accepted 4 May 2006)

Abstract : In new generation vehicle technologies, a fuel cell vehicle becomes more important, by virtue of their emission merits. In addition, a fuel cell is considered as a major source to generate the electricity for vehicles in near future. This paper focuses on modeling of not only an electric vehicle and but also a fuel cell vehicle to estimate performances. And an EV cart is manufactured to verify the modeling. Speed, voltage, and current of the vehicle and modeling are compared to estimate them at acceleration test and driving mode test. The estimations are also compared with the data of the Ballard Nexa fuel cell stack. In order to investigate a fuel cell based vehicle, motor and fuel cell models are integrated in a electric vehicle model. The characteristics of individual components are also integrated. Calculated fuel cell equations show good agreements with test results. In the fuel cell vehicle simulation, maximum speed and hydrogen fuel consumption are estimated. Even though there is no experimental data from vehicle tests, the vehicle simulation showed physically-acceptable vehicle characteristics.

Key words : Electric vehicle(전기자동차), Motor-battery model(모터-배터리 모델), Simulation(모의실험), Fuel Cell Model(연료전지 모델), Fuel cell electric vehicle(연료전지 전기자동차), SOC(State of charge : 충전상태), Maximum speed(최고속도), Driving mode(주행 모드)

Nomenclature

m_v	: vehicle mass
θ_{wheel}	: wheel inertia
r_{wheel}	: wheel radius
T_{wheel}	: wheel torque
q	: driver request for braking
F_{brake_max}	: maximum braking force
g	: acceleration of gravity
μ_1	: friction independent from velocity
μ_2	: friction linear dependant on velocity
μ_3	: friction quadratic dependant on velocity
v	: vehicle velocity
ρ	: density of air
c_w	: coefficient of drag
A_f	: frontal area
I_a	: armature current

*Corresponding author, E-mail: yscho@kookmin.ac.kr

R_a : armature resistance
L_a : armature inductance
ω_m : angular velocity
J : motor inertia moment
μ : viscous friction coefficient
i : current density
i_0 : exchange current density
A : constant for activation loss
i_n : internal current
r_{stack} : the area-specific resistance
i_l : limiting current density
R : universal gas constant
F : faraday constant
m, n : constant for mass transport or concentration loss
V_c : voltage of a cell
E_{oc} : open circuit voltage
$\dot{m}_{H_2}$: H_2 usage
MW_{H_2} : molar mass of hydrogen
$\eta_{converter}$: converter efficiency
V_{motor} : voltage supplied in motor
I_{motor} : current supplied in motor
V_{FC} : voltage produced in fuel cell
I_{FC} : current produced in fuel cell

1. 서 론

현재 운송수단에 있어서 화석연료 기반의 에너지 소비는 심각한 환경오염 문제와 화석연료의 고갈 문제를 가중시키고 있으며, 이로 인해 전 세계적으로 기존의 화석 연료를 대체할 수 있는 새로운 에너지원을 개발하기위해 수많은 노력을 기울이고 있다.

대체 에너지원으로서 주목받고 있는 기술로는 하이브리드 자동차, 연료전지 자동차 등과 같은 전기에너지를 사용하는 자동차 기술을 들 수 있다. 이러한 전기에너지 기반의 자동차 개발을 위해서는 전기자동차 기술의 이해가 필수적이다. 전기자동차는 연소 과정이 존재하지 않기 때문에 배기가스에 의한 오염문제를 일으키지 않으며 기존의 내연기관 자동차에 비해 종합적인 에너지 효율이 높다는 장점이 있다. 그러나 축전지의 낮은 저장 밀도로 인해 1회 주행 거리가 짧고, 중량이 무거워서 가속 성능이 좋지 못하다는 단점을 갖고 있다.[1] 따라서 최근의 연구동향은 하이브리드 기술 및 연료전지 자동차 기술에 그 초점이 모아지고 있다.

본 논문에서는 연료전지 자동차 개발의 선행연구로써, 실제 제작한 소형 전기자동차 카트의 성능실험을 수행하였고 모터 및 배터리의 물리적 특성을 고려한 시뮬레이터를 개발하였다. 이를 통해 연료전지 자동차의 기반이 되는 전기자동차의 통합적인 이해를 구축하였다. 또한 동력원으로 사용할 연료전지의 성능 실험 및 시뮬레이션을 통하여 최종적으로 연료전지 자동차의 성능 예측 시뮬레이터를 개발하였다.

2. 전기자동차

2.1 전기자동차 성능 실험

전기자동차의 성능실험을 위해 실제 제작한 1인승 전기자동차 카트의 제원을 Table 1에 정리하였다. 차량은 상용 1인승 카트의 프레임을 개조하여 제작하였고, 조향장치는 랙앤피니언 방식을 사용했으며, 구동축에 유압식 디스크 브레이크를 장착하였다. 배터리는 12V 산업용 납산 배터리(lead-acid battery)를 사용하였고 가속페달의 개도를 측정하기 위하여 가변저항을 연결하였다. Fig. 1은 카트 프레임 및 주요 구성요소의 배치도를 나타낸다.

또한 차량의 구동을 위해 12V, 400W급 영구자석형 DC모터와 PWM(pulse-width modulation)방식의 모터 속도 제어 시스템을 적용하였다. PWM방식은 배터리에서 모터로 인가되는 전압의 on/off 주기를

Table 1 Specifications of the EV cart

Vehicle weight(kg)	120
Motor power(W)	400
Battery	12V lead-Acid battery
Transmission	N/A
Drivetrain	MR, chain connected
Final reduction ratio	1.545
Wheel radius(mm)	215
Aerodynamic drag	0.30
Frontal projection(m^2)	0.7125
coefficient of friction	0.015

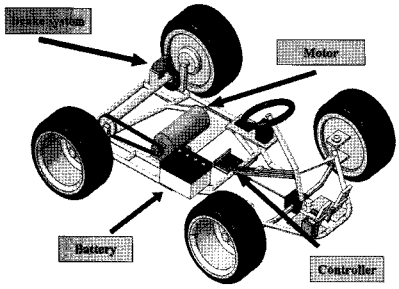


Fig. 1 3D modeling of the EV cart

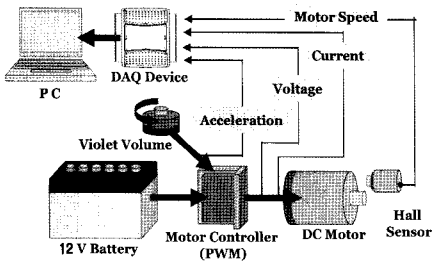


Fig. 2 Schematic diagram of data aquisition for EV cart

변조하여 모터의 속도를 제어하는 방식이다. 생성된 파형에 따라 배터리에서 모터로 공급되는 전압의 시간에 따른 on/off 주기가 결정되며 이때의 입력 신호는 운전자의 가속 페달 조작 비율에 의해 결정된다.[2,3] 모터는 최종 출력 회전수가 220rpm인 저속, 고토크의 기어 일체형 모터이다.

Fig. 2는 전기자동차 카트의 성능 실험에 대한 개략도이다. 실험은 전기자동차 카트의 주행 상태를 파악하기 위해 모터에 인가된 전압과 전류, 가속 페달의 개도, 그리고 모터의 회전속도 등을 측정하였다.

2.2 전기자동차 시뮬레이션

시뮬레이션에서 사용된 전기 자동차의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 운전자가 선택하는 주행의 조건은 가속페달과 감속페달의 개도이며 이 둘은 동시에 조작될 수 있도록 구성하였다.

시뮬레이션은 배터리, 모터 제어기, 모터, 차량의 네 가지 모델이 연동하여 계산을 수행하게 된다.

위의 차량 동력전달 부분 계산에 사용된 수학적 모델은 다음과 같다.

$$v(t)=\frac{1}{\left(m_v+\frac{\theta_{wheel}}{r_{wheel}^2}\right)}\times\int_{t=0}^{t}\begin{pmatrix}\frac{T_{wheel}}{r_{wheel}}+q\times F_{brake_max}\\-mg\left(\mu_1+\mu_2 v+\mu_3 v^2\right.\\\left.+\sin\left(\tan^{-1}\left(\frac{grade}{100}\right)\right)\right)\\-\frac{1}{2}\rho c_w A_f v^2\end{pmatrix}dt \quad (1)$$

DC 모터의 특성에 관한 수학적 해석에서, 먼저 모터로 공급되는 전류는 배터리 전압과 그 순간 모터의 각속도, 인덕턴스 등의 영향에 의해 식 (2)와 같

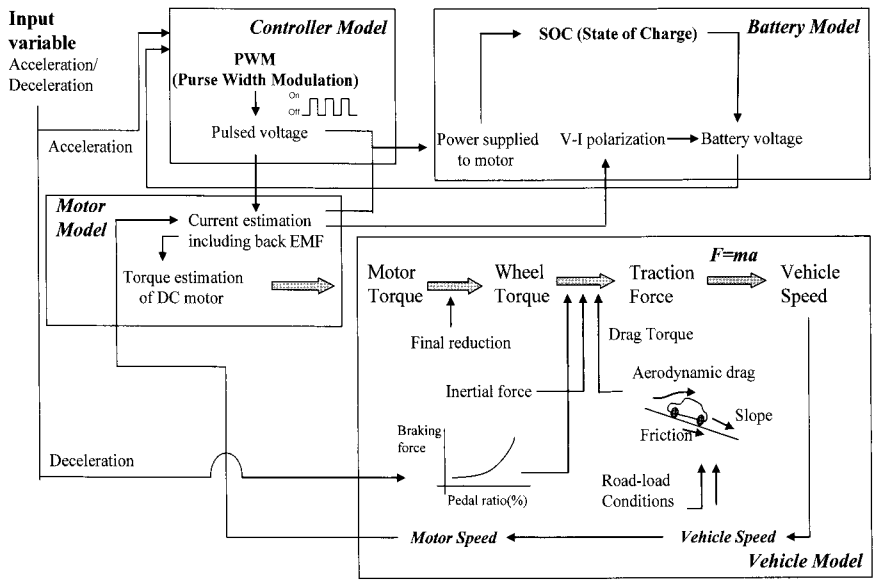


Fig. 3 Schematic diagram of motor-battery based vehicle model

이 결정된다.[4]

$$V_s = I_a(t)R_a + L_a\frac{dI_a(t)}{dt} + k_a\omega_m(t) \quad (2)$$

다음으로 모터에서 발생되는 토크는 모터의 기하학적 특성에 의해 결정되는 토크 상수 k_T와 회전자(armature) 전류에 의해 결정된다.[4]

$$T(t) = k_T I_a(t) - \mu\omega_m(t) - J\frac{d\omega_m(t)}{dt} \quad (3)$$

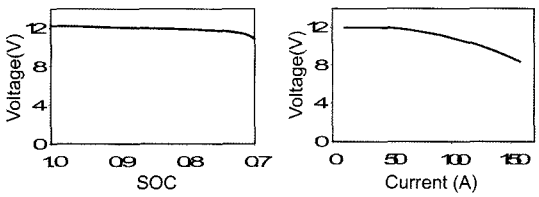
위 식 (2), (3)을 통해 최종적으로 모터의 전류와 토크를 결정하였다. 수학적 해석에 이용된 모터의 계수들은 Table 2에 나타냈다.

Table 2 Characteristic constants of the motor

ω_m(rad/s)	261.67
T_o(N · m)	29.77
R_a(Ω)	0.0650
L_a(H)	0.0048
J(kg · m^2)	0.0370

배터리의 전압은 순간전류 요구량과 SOC의 영향을 받는다. 순간 전류 요구치가 크면, 배터리의 전극에서 이루어지는 화학반응 속도를 초과하여 단자전압이 낮아지는 분극(polarization)이 발생한다. 또한, 배터리의 SOC 감소에 따라 배터리가 낼 수 있는 전압이 감소하게 된다. Fig. 4는 본 연구에 사용된 배터리의 전압 특성이며, 이는 실험을 통하여 얻은 결과로써 모델링 시 배터리의 특성으로 이용하였다. 배터리의 SOC 감소를 나타내는 식 (4)에서 V_{max}와 Ah는 배터리의 초기 충/방전량의 크기에 따라 변하며, 측정값을 모델링의 초기 값으로 적용하였다.[5]

$$SOC = SOC_p - \frac{P \times \Delta t}{3600 \times V_{max} \times Ah} \quad (4)$$



(a) Voltage vs SOC (b) Voltage vs Current

Fig. 4 Voltage Characteristics of the battery applied in the EV cart

3. 연료전지 실험 및 모델링

3.1 연료전지 성능 실험

Fig. 5는 본 연구에 적용된 1.2kW의 PEM 연료전지인 Ballard Nexa power module을 나타낸다. 본 실험에서는 연료전지의 성능 특성을 파악하기 위하여 고전류형 저항 회로를 통해 다양한 부하조건을 설정하였고, 각 조건에서 스택의 전압, 전류, 출력 및 연료소모량 등을 측정하였다.

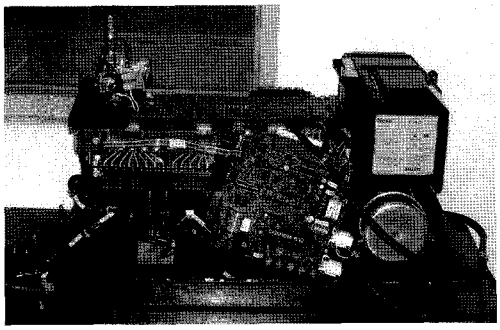


Fig. 5 Ballard Nexa power module fuel cell

3.2 연료전지 모델링

연료전지의 성능을 평가하기 위한 가장 중요한 요소는 연료전지 시스템의 전류-전압 특성 관계로서, 분극 특성에 대한 고려가 필요하다. 연료전지의 분극 특성은 4가지의 주요한 원인에 의해서 규정되며, 각각의 현상은 다음과 같다.[6]

- 활성화 손실과 연료교차 및 내부 전류손실

$$\Delta V_{act} = Aln\left(\frac{i+i_n}{i_o}\right) \quad (5)$$

- 저항손실

$$\Delta V_{ohm} = ir_{stack} \quad (6)$$

- 질량이동 또는 농도 손실

$$\Delta V_{trans} = -\frac{RT}{2F}\ln\left(1-\frac{i}{i_l}\right) = -m\exp(ni) \quad (7)$$

위와 같은 전압강하에 의한 효과를 고려하면, 한 개의 셀에서 실제로 얻을 수 있는 전압은 다음과 같이 나타낼 수 있다.[6]

$$V_c = E_{oc} - \Delta V_{act} - \Delta V_{ohm} - \Delta V_{trans} \quad (8)$$
$$= E_{oc} - A\ln\left(\frac{i+i_n}{i_o}\right) - ir_{stack} + m\exp(ni)$$

r_{stack}은 stack의 전류와의 상관관계로부터 도출하였다.[7] 또한 E_{oc}는 셀 하나에서 나올 수 있는 이론적인 전압값으로 온도에 따른 수소의 Gibbs free energy와 Faraday 상수를 통해 계산하였다. 나머지 변수들은 저온에서 작동되는 셀에 대해 기존에 규명된 상수값을 적용하였고 수식에 사용된 파라미터들을 Table 3에 정리하였다.[6]

Table 3 Characteristic constants of Ballard Nexa PEMFC

E_{oc} (V)	1.23
A (V)	0.058
i_n (mAcm^{-2})	3
i_0 (mAcm^{-2})	0.04
m (V)	0.00003
n (cm^{2}mA^{-1})	0.008

연료전지에서 발생되는 전류는 결국 공급된 수소에서 분리되는 전자에 의해 발생되므로, 스택에서 발생된 전류의 양을 이용하면 수소 연료의 사용량을 계산할 수 있게 된다. 수소 소모량은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.[8] 이는 공급된 수소가 모두 전자를 방출하고 이온화할 때의 이론적인 상황을 의미한다.

$$\dot{m}_{H_2} = MW_{H_2} \times \frac{I \times n_c}{2F} \quad \text{(kg/s)} \quad (9)$$
$$= 1.05 \times 10^{-8} \times I \times n_c$$

3.3 연료전지 자동차 모델링

전기자동차 카트와 연료전지의 성능실험 및 모델링 구축을 통해 최종적으로 연료전지 자동차의 성능을 예측할 수 있는 시뮬레이터를 개발하였다.

연료전지 시뮬레이션에 사용된 개략도를 Fig. 6에 나타내었다. 모터 및 제어기, 그리고 동력전달에 관한 수학적 모델은 위의 전기자동차 모델 동일하게 적용하였으며, 연료전지의 모델링은 배터리 부분을 연료전지로 대체하여 적용하였다.

분극작용으로 인해 큰 폭의 전압강하 특성을 갖는 연료전지는 모터에 안정적인 전압을 공급하기 위해 DC/DC 컨버터가 필요하다. 수식 (10)은 시뮬레이터에 적용한 DC/DC 컨버터의 수학적 모델을 나타내고 있다. 컨버터의 출력 변환 효율은 부하에 따라 변하며 일반적으로 전부하 상태에서 80%이상의 효율을 보인다.[9] 본 논문에서는 연료전지자동차의 최대속도 및 가속시간, 그리고 이동거리에 중점을 두었으므로 전부하 상태를 고려하여 80%로 효율을 가정하였다.

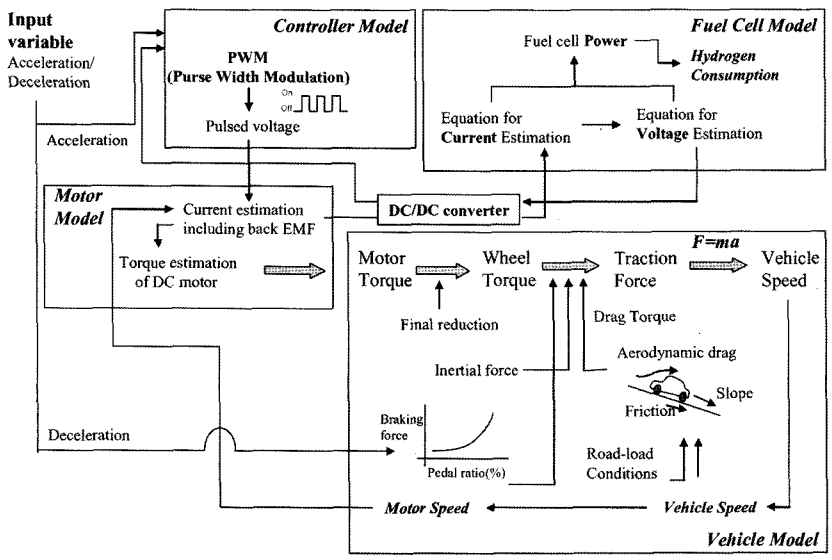


Fig. 6 Schematic diagram of fuel cell vehicle model

$$I_{motor} = \eta_{converter} \times \frac{V_{FC} \times I_{FC}}{V_{motor}} \quad (10)$$

4. 결과 및 고찰

4.1 전기자동차 성능실험 및 모델링

차량의 성능평가는 전기자동차 카트의 주행을 통해 측정한 데이터를 이용하였다. 운전조건은 가속주행 및 모드주행을 적용하였고, 이 과정에서 실시간으로 모터의 전류, 전압 및 회전수 변화를 측정하였다. 이때 시뮬레이터의 입력조건은 실험에서 측정한 가속페달의 개도를 사용하여 동일한 운전조건하에서 차량의 동력특성을 예측하였다.

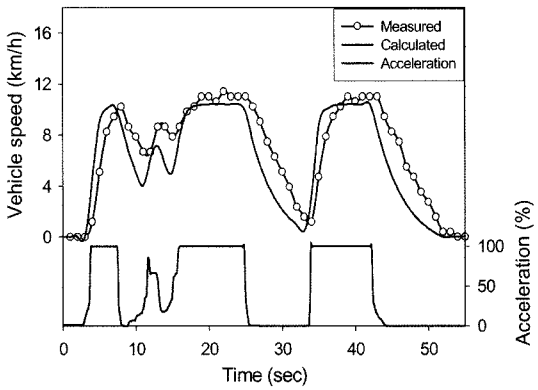


Fig. 7 Vehicle speed profile of a simple driving cycle mode

Fig. 7은 실험에 적용된 모드주행시의 가속페달 개도에 따른 실제 차량 속도 및 계산결과를 나타낸다. 가속페달이 급격하게 전개되었을 때, 계산결과에서 속도가 다소 빠른 응답성을 보이지만, 전 영역에 걸쳐서 가속페달 조작에 따라 차량의 속도변화가 잘 반영되고 있다.

Fig. 8과 Fig. 9는 모드 주행 시의 전류, 전압변화를 나타낸다. 전류와 전압 또한 가속페달 조작에 따른 차량의 상태변화를 잘 반영하고 있다.

Fig. 8에서 모터에 공급되는 전류값은 전 구간에서 동일한 경향을 보이나 최대값에서 다소 차이를 보인다. 이와 같은 급가속 구간에서의 오차는 앞서 나타난 속도의 응답성 차이에 대한 원인으로, 모터에 공급되는 전류량과 모터에서 발생하는 토크의 계산에 의한 오차로 볼 수 있다.

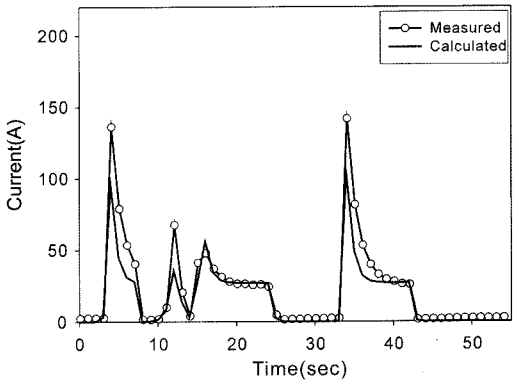


Fig. 8 Current profile of a simple driving cycle mode

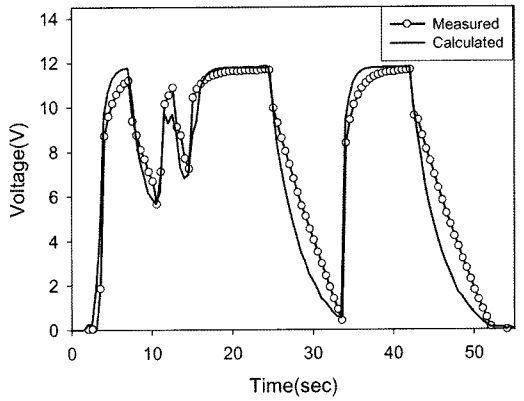


Fig. 9 Voltage profile of a simple driving cycle mode

그래프의 데이터를 분석하여 최고속도와 도달시간에 대해 Table 3에 나타내었다. 최고속도는 계산값이 실제 차량에 비해 1.9% 낮으며, 최고 속도까지의 도달시간에서 약 6.7%의 오차가 발생했다. 이러한 오차의 원인으로는 노면과의 마찰에 의한 해석적 오차와 전류 및 전압의 계산 오차, 또한 모터의 토크계산에서 발생하는 에너지 손실 등이 있다.

최고속도 및 도달시간, 그리고 간단한 모드주행을 통해 실차 테스트 결과와 계산 결과를 비교한 결과 급격한 가감속 구간에서 일시적인 기울기 차이는 나타나지만 차량 속도, 전압, 전류의 시간에 따른 변화특성은 매우 잘 일치하는 것으로 확인되었다.

Table 3 Summary of maximum speed driving mode

	EV cart	Simulation	Error
0~max speed(sec)	6.0	6.4	6.7%
Max speed(km/h)	10.22	10.41	1.9%

4.2 연료전지 성능실험 및 모델링

Nexa power module의 성능 실험결과와 계산결과를 Fig. 10에 나타내었다. 전류 및 전압은 스택의 gross 특성(반응한 수소의 총량 기준)을 나타내며, 실험값과 계산값은 전류에 따른 전압 변화에 있어서 매우 잘 일치한다.

본 연구에 사용된 스택의 전체 작동범위 내에서 실험값과 계산값이 동일하게 나타나므로 계산에 이용된 해석 모델은 Nexa power module에 대해서 그 타당성이 확인되었다.

Fig. 11은 스택의 출력에 따른 수소의 소모량을 나타낸 것이다. 실험값과 계산값은 평균적으로 3.4%의 오차율을 보이며 매우 일치하였다. 이러한 오차의 원인으로는 측정 과정에서 스택 작동온도의 변화와 수소의 공급압력 등이 있다.

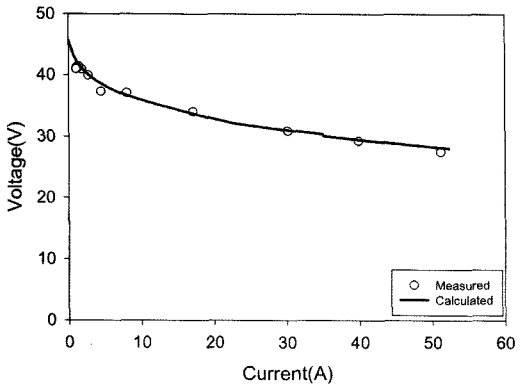


Fig. 10 Polarization curves of Nexa fuel cell and fuel cell model

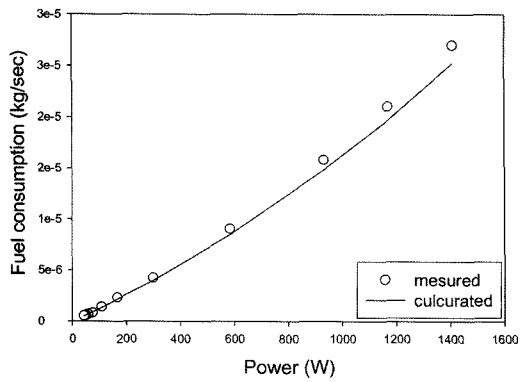


Fig. 11 Fuel consumption of Nexa fuel cell and fuel cell model

4.3 연료전지 자동차 시뮬레이션 결과

연료전지 자동차 시스템의 성능해석은 최고시속 계산 및 정속주행 시 수소연료 소모량에 대하여 수행되었다. 시뮬레이션 결과, 연료전지 자동차의 최고 속도는 10.41km/h이며 도달시간은 약 7.2초를 나타냈다.

또한 최고속도로 정속 주행 조건에서 수소의 소모량을 계산한 결과 1g의 수소를 사용하여 약 400.4m를 주행하는 것으로 나타났다. 해석결과를 검증하기 위해서는 해석조건과 같은 실제 차량을 개발하여 평가하여야만 해석모델 및 연료전지 모델의 정확한 특성을 평가할 수 있을 것으로 생각되나, 본 연구와 같은 방법으로 각 단품의 수학적 해석을 통해 물리적으로 타당한 차량의 성능을 예측할 수 있다는 점에서 큰 의미를 가진다고 볼 수 있다. 향후의 연구를 통해 본 해석에 적용된 연료전지 자동차를 제작하여 해석 결과를 평가하고 더 효과적인 시스템 모델링 기법을 연구하고자 한다.

5. 결 론

본 연구에서는 소형 전기자동차카트를 제작하여 차량의 운행특성을 파악하였고, 이를 이용하여 운행특성을 예측할 수 있는 해석시스템을 구축하였다. 이 해석 시스템은 모터를 이용하는 전기자동차의 특성을 효과적으로 재현할 수 있었다. 또한, 연료전지 시스템의 실험을 통하여 전압-전류 관계 및 연료 소모량을 분석하고 연료전지 시스템 내의 현상들을 예측하였다. 연료전지 시스템의 해석을 전기자동차 모델에 적용하여 연료전지 자동차 시뮬레이터를 완성하였다. 이를 통하여 연료전지 자동차의 차량성능 및 연료 소모량을 예측하였다. 이 연료전지자동차 시뮬레이션은 차후 연료전지 하이브리드 자동차 개발에 사용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 국민대학교 우수연구센터 사업의 지원하에 국민대학교 자동차공학 전문대학원 열기관 실험실의 연구과제로 수행되었음.

References

1) D. J. Kang, W. K. Kang and K. R. Cho, Introduction to Automotive Environment, Korea Automotive Environment Center Edition, Munundang, Seoul, Korea, pp.141-142, 2000.
2) R. Valentine, Motor Control Electronics Handbook, Mc Graw Hill, New York, pp.25-28, 1998.
3) W. H. Lee, Motor Control Technology for Mechatronics, Seong An Dang, Seoul, Korea, pp.54-63, 1992.
4) G. Rizzoni, Principles and Applications of Electrical Engineering, International Student Edition, pp.826-828, 1993.
5) X. He, "Battery Modeling for HEV Simulation Model Development," SAE 2001-01-0960, 2001.
6) J. Larminie, Fuel Cell Systems Explained, Wiley, New York, pp.25-66, 2000.
7) W. H. Zhu, R. U. Payne, D. R. Cahela and Bruce J. Tatarchuk, "Uniformity Analysis at MEA and Stack Levels for a Nexa PEM Fuel Cell System," J. Power Source 128, pp.231-238, 2004.
8) J. Larminie, Fuel Cell Systems Explained, Wiley, New York, pp.391-400, 2000.
9) X. Kong, L. T. Choi and A. M. Khambadkone, "Analysis and Control of Isolated Current-fed Full Bridge Converter in Fuel Cell System," 30th Annual Conference of IEEE, Vol.3, pp.2825-2830, 2004.