

소형연료전지 자동차의 부하특성에 따른 시스템 설계에 관한 기초연구

김흥건*, 강영우⁺, 김유신⁺

(논문접수일 2004. 4. 14, 심사완료일 2004. 5. 25)

Fundamental Study on System Design as Load Character of the capacity Small Fuel Cell Vehicle

H. G. Kim*, Y. W. Kang⁺, Y. S. Kim⁺

Abstract

Feasibility of the small capacity fuel cell powered vehicle is carried out for system design with loading characteristics. The major design concepts which include battery, driving motor, and fuel cell module are analyzed and discussed for the future development. A load characteristics program is developed in order to calculate the traction power of fuel cell vehicle according to the driving courses specified. Further, the small capacity fuel cell vehicle is analyzed to determine the capacity of stack as a function of the velocity for an appropriate power required.

Key Words : Fuel Cell(연료전지), Performance Analysis(성능해석), Mini-Baja(소형연료전지 자동차), Traction Power(견인력), Load Characteristics(부하특성)

1. 서론

산업혁명 이후 급속한 기술문명의 발달과 중화학공업의 발달로 에너지 사용이 급속도로 증가하였으며, 20세기 이후 대기오염은 인간 생활의 커다란 문제로 대두되었다. 화석연료는 매장량에도 한계가 있을 뿐만 아니라, 환경오염의 주요 요인이 되어 왔다. 특히, 자동차는 운송용으로써 가장 큰 몫을 차지하고 있긴 하지만, 유해한 배기가스 오염의

방출로 인해 환경오염뿐만 아니라 인체에까지 커다란 악영향을 끼치고 있다. 최근 국내는 환경문제의 심각성을 인식하여 일부 도심지역에 천연가스를 이용한 자동차를 도입해 대기오염 및 인체에 대한 악영향을 줄이기 위해 노력하고 있다. 현시점에서 볼 때 적절한 선택이라 할 수는 있겠지만, 천연 가스를 이용한 자동차라 할지라도 배기가스 중에 유해물질이 함유되어 있으며 매장량에도 한계가 있기 때문에 대체 에너지로서의 한계성을 가지고 있다고 할

* 전주대학교 기계공학과 (hkim@jj.ac.kr)
주소: 560-759 전북 전주시 완산구 효자동 3가 1200번지
+ 전주대학교 대학원 기계공학과

수가 있다. 앞으로 대두되어질 에너지원의 고갈과 환경오염을 고찰해 본다면, 앞으로의 연구과제는 새로운 무공해 대체에너지와 무한한 양을 가진 에너지 자원의 개발이 절실히 요구된다. 대체에너지는 공해물질을 배출하지 않으면서 풍부한 유용성과 고효율의 경제적 가치를 가지고 저장운송이 용이해야 한다. 이러한 면에서 볼 때 수소야말로 가장 유망한 대체연료라 볼 수 있다^(1,2).

세계에너지 소모량은 1996년 436 Trillion kWh에서 2020년 65%가 증가한 711 Trillion kWh가 될 것으로 예측하고 있다. 특히 개발도상국에서의 에너지 소모는 급격히 증가하여 1996년 선진국의 60% 수준에서 2020년에는 선진국의 에너지 소비량을 초과 할 것으로 예측하고 있다⁽³⁾.

국내 에너지의 사용량은 매년 10.4% 증가하고 있어 미국, 일본 등의 선진국에 비하여 높은 증가율을 보이고 있다. 국내 에너지 소비는 석유에 60.5%를 의존하고 있어, 미국 39.1%, 일본 53%에 비해 높은 의존도를 보이고 있다. 에너지의 해외 의존도는 97.3%로 대부분의 에너지를 해외에 의존하고 있다. 최근 에너지 시장에서의 주요한 관심사는 에너지 고갈 문제보다 환경오염 문제에 초점이 맞추어져 있다.

연료전지 자동차의 핵심기술은 연료전지와 축전지의 연계 운전에 의해 동력을 공급하는 엔진부로서 부하의 증가/감소에 따른 변화에 쉽게 동력을 공급할 수 있고, 더불어 에너지의 이용 효율을 극대화시킬 수 있는 효율적인 설계 및 제어 시스템의 구현이 요구된다⁽⁴⁾. 따라서, 본 연구에서는 가장 효과적으로 개발될 수 있는 연료전지 자동차의 적절한 부하 해석, 성능해석 및 설계조건 등을 검토하였으며 소형연료전지 자동차의 시스템을 설계하였다. 그리고 연료전지 자동차의 동력원으로 선정된 고분자전해질 연료전지(PEMFC)를 주동력원으로 하고 축전지를 보조동력원으로 사용하는 복합구동 승용차의 성능해석을 수행한 후 이에 따른 성능해석용 프로그램을 개발하여 그 결과를 고찰하였다.

2. 소형연료전지 자동차의 시스템 설계

2.1 축전지 시스템 설계

축전지를 효율적으로 사용하기 위하여 변화하는 동작 조건에 대한 축전지의 반응을 이해하는 것이 중요하다. 축전지에 저장된 에너지는 전기적 에너지로 변환되어지는 화학적 에너지로서 재충전할 수 있는 가역반응이다. 축전지의 입출력은 충전 상태, 충전 능력, 충전률의 비율, 주위 온도 및 수명에 따르는 함수이며 그 관계는 매우 복잡하다. 축전

지의 모델은 여러 가지가 있는데, 이상적인 축전지 모델은 축전지의 내부저항이나 외부의 전력 변환장치 또는 부하에 의한 어떠한 영향도 고려하지 않은 항상 공급 전압이 일정한 이상적인 전압원 모델이다. 즉 무부하 전압이 축전지의 단자전압이 되는 전지의 이상적인 모델을 의미한다. 근래에는 주로 테브난 모델이 축전지를 모델링 하는데 가장 보편적으로 사용되어왔고, 가장 일반적인 축전지 모델이라고 할 수 있는 축전지 단자전압의 동작특성을 나타내 주는 간단한 모델이다. 이 모델은 선형 모델식에서 과전압 특성을 가지는 내부 콘덴서와 내부 저항이 병렬 연결되고, 이것이 외부 저항과 직렬 연결된 전기적 회로를 포함한 등가회로로 나타내진다.

축전지의 종단 전압은 충전전 전류의 함수로서, 충전전 전류가 일정할 경우에 실제 축전지의 개방 전압과 내부저항 그리고 충전상태(SOC)의 함수이며 실험에 기초하여 많은 관계식들이 주어지고 있는데, 일반적으로 내부 저항은 충전 상태에 반비례하므로 다음과 같이 정적 상태의 축전지의 모델 식 (1)을 구할 수 있다

$$e_{tb} = V_{OC} - (R_b + \frac{K}{SOC}) i_{tb} \quad (1)$$

여기서

e_{tb} : 축전지의 종단 전압, V_{OC} : 개방회로 전압

R_b : 축전지의 종단저항, K : 분극저항

i_{tb} : 축전지의 충전전 전류

축전지 충전상태 S는 아래의 식 (2)와 같이 시간에 대한 전류의 적분과 축전지 용량 C에 관계된다.

$$S = S_0 - \int_0^T \frac{I_{BT}(t)}{C} dt \quad (2)$$

여기서 S_0 는 초기 충전상태, T는 총시간이다.

적분은 평균전류 ICUR과 총 시간의 곱과 같으므로 S를 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$S = \frac{S_0 - ICUR \times T}{C} \quad (3)$$

축전지 용량 C에 대한 선형함수모델은 식 (4)와 같다.

$$C = C_0 \times [B_0 + B_1 \times (\frac{ICUR}{T_0})] \quad (4)$$

여기서 C_0 는 일정전류 I_0 상태에서 용량이고 $ICUR$ 은 평균전류이며, B_0 와 B_1 은 실험 데이터로부터 구해지는 상수이다.

2.2 전동기 시스템 설계

연료전지와 축전지에서 자동차의 구동원인 전동기로 전력을 공급한다. 전동기의 제어 시스템은 설계 요소이다. 초기 단계의 연료전지 자동차는 전기자동차에서 얻은 경험을 이용하여 설계됨이 바람직하다는 점은 알고 있다. 전기자동차에서는 직류와 교류 전기 모두를 사용하고 있다. 전동기의 모델은 회전자 초퍼 모드나 약전 계자 모드로 운전되는 분리된 여자 직류모터에서 예측한다. 형태는 모터의 기본속도와 같거나 적은 모터 출력속도에 의해 특성화되었다. 직류모터의 입출력 특성에 의한 개통식은 보통 다음과 같은 식 (5)~(7)로 나타내고 있다⁵⁾.

$$\frac{di_a(t)}{dt} = \frac{1}{L_a} e_a(t) - \frac{R_a}{L_a} i_a(t) - \frac{1}{L_a} e_b(t) \quad (5)$$

$$T_m(t) = K_i i_a(t) \quad (6)$$

$$e_b(t) = K_b \frac{d\theta_m(t)}{dt} = K_b \omega_m(t) \quad (7)$$

여기서

$i_a(t)$: 전기자 전류, L_a : 전기자 인덕턴스

$e_a(t)$: 전기자 전압, R_a : 전기자 저항

$e_b(t)$: 역기전력, $T_m(t)$: 모터토크

K_i : 토크정수, $i_a(t)$: 전기자 전류

K_b : 역기전력 정수, $\theta_m(t)$: 회전자 변위

$\omega_m(t)$: 회전자 각속도

모터의 회전자 전류와 회전자 전압을 위한 회전자 초퍼 모드에서의 방정식은 회전자 전류와 전압과 축전지 출력 전압이 모터의 출력 속도와 토크에 일치된 값에 수렴하도록 반복해서 풀어야 한다. 모터의 출력은 회전자 전류와 유기 기전력의 곱에 비례한다. 회전자 동력 손실 RPL 은 회전자 전류의 항이다.

$$RPL = RI^2 \times RA + BDV \times RI + WIL \times POV^2 \quad (8)$$

여기서

RA : 회전자 회로저항(Ω), BDV : 브러시 드롭(V)

WIL : 풍력손실상수(W/rpm^2), RI : 회전자 전류(A)

POV : 모터 출력속도

회전자 전압 RV 는 식 (9)와 같고, PMO 는 모터출력동력(Watt)을 나타낸다.

$$RV = \frac{(PMO + PL)}{RI} \quad (9)$$

계자 동력손실 PPL 은 축전지 출력전압(OV)에 의존한다. 여기서 RF 는 강 계자 저항이다.

$$PPL = \frac{OV^2}{RF} \quad (10)$$

약 계자모드에서 회전자 전류의 계산은 초퍼 모드 상에서 간단한 모사식으로 실행하였다. 이 경우 회전자 전류는 식 (11)과 같다.

$$RI = \frac{(PMO + RPL)}{OV} \quad (11)$$

회전자 동력손실은 식 (10)처럼 주어진다. 주의할 점은 회전자 전압은 축전지 전압과 같다. 계자동력손실 PEL 은 식 (12)와 같다.

$$PEL = IFF^2 \times RF \quad (12)$$

계자 전류 IFF 는 기본 속도와 모터 출력 속도의 비와 함수로 모델화 하였다. 위의 방정식은 입력 방향에서 출력방향으로 쓰여졌다. 만약 모터의 회전자 전류의 한계치 보다 큰 회전자 전류의 값이 생기는 출력 조건이라면, 회전자 전류는 회전자 전류의 한계치와 모터 출력 토크에 맞게 설계되어야 하고 그러면 전동장치 토크의 최종 잔여치는 정확히 일치한다.

2.3 연료전지 모듈 시스템 설계

시스템 분석은 시스템 전체를 이해하기 위해 열이나 에너지의 정산에 대한 이해가 필요하다. 연료전지 주위의 에너지 정산은 열 입·출입, 출력, 반응, 열 손실 등 연료전지에서 생기는 에너지의 요소에 기초를 한다. 에너지 변환장치의 열효율은 저장된 화학적 에너지의 변화에 대한 연료가 산화제와 함께 반응할 때 나오는 유용한 에너지의 생산량으

로 정의된다⁽⁶⁻⁸⁾.

$$\eta = \frac{\text{Useful Energy}}{\Delta H} \quad (13)$$

연료전지와 같은 이상적인 전기 화학적 변환기에서 어떤 변환 온도에서 Gibbs 자유에너지 변화가 유용한 전기에너지의 생산에 이용된다. 비가역적으로 작동할 때 연료전지의 이상적인 효율은 식 (14)와 같다.

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (14)$$

가장 널리 사용되는 연료전지의 효율은 Cell 반응의 표준 자유에너지의 변환에 기초한다.



여기서 생산된 물은 액체이다. 25°C, 1기압의 표준 상태에서 산소/수소 반응의 화학적 에너지($\Delta H = \Delta H_0$)는 285.83kJ/mole이고, 표준상태에서 순수한 수소/산소의 가역 작용에서 열효율은 0.83(237.141/285.83)이다. 실제적인 연료전지의 효율은 이상 전위에 대한 실제 작동 전압의 비율로 표시된다. 실제적인 Cell의 전위는 Cell의 분극과 IR 손실로 인해 이상적인 Cell 전압보다 낮다. 연료전지의 실제적인 효율은 실제적인 Cell의 효율로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\text{Useful Energy}}{\Delta H} = \frac{\text{Useful Energy}}{\Delta G/0.83} \\ &= \frac{V_{\text{actual}} \times \text{Current}}{V_{\text{ideal}} \times \text{Current}/0.83} = \frac{0.83 V_{\text{actual}}}{V_{\text{ideal}}} \end{aligned} \quad (16)$$

25°C, 1기압에서 순수 수소와 산소를 사용한 이상적인 가역 전위는 1.229V이다. 그러므로 실제 작동 전압이 V_{cell} 일 때 수소의 고위 발열량을 기초로 한 열효율은 식 (17)과 같다.

$$\begin{aligned} \eta &= 0.83 \times V_{\text{cell}} / V_{\text{ideal}} = 0.83 \times V_{\text{cell}} / 0.229 \\ &= 0.675 \times V_{\text{cell}} \end{aligned} \quad (17)$$

3. 소형연료전지 자동차 성능해석

소형연료전지 자동차 성능해석에 대한 흐름도는 아래

Fig. 1과 같다. 이 프로그램은 설계된 연료전지 동력장치에 의한 연료전지 자동차가 실제의 여러 가지 운전 경로에서 정상적으로 운행될 수 있는지를 검증하기 위한 것이고, 프로그램은 Visual Basic을 이용하여 구현하였다.

소형연료전지 자동차에 대한 성능 해석은 Fig. 1의 흐름도에 제시한 것과 같이 먼저 운전경로를 설정하고, 그 경로에서의 각 구획마다 자동차에서 요구하는 견인력을 구하여 연료전지나 축전지에서 공급할 수 있는 동력원을 계산한다. Fig. 2는 소형연료전지 승용차가 운행하는 기본적인 운전 경로로서 일반적인 운전 방식이 그러하듯이 가속 구간, 정속 구간, 감속 구간의 세 단계로 구분되어 있는 운전 방식을 보여준다. 거의 모든 운전 방식은 Fig. 2의 운전 방식의 응용이라고 생각할 수 있다.

소형연료전지 전기자동차(Mini-Baja)는 도심에서 운행할 수 있게 고안되어 자동차 평균속도가 약 30~40km/h로 운행이 가능하게 제한하였다. Fig. 3은 Fig. 2의 운전 방식에서 연료전지 전기자동차가 운행할 때 자동차에 기본이 되는 견인력이 얼마인가를 보여준다.

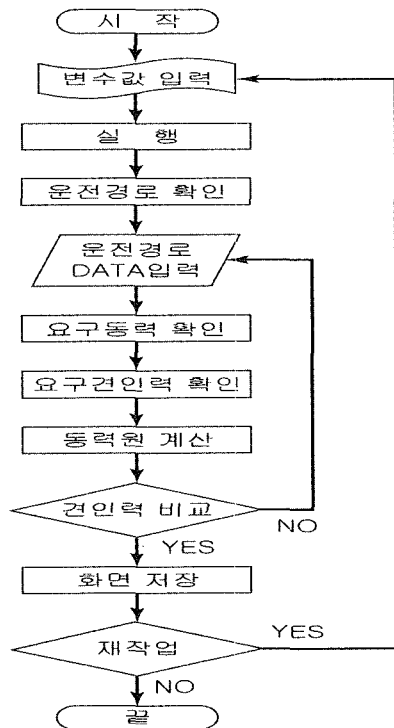


Fig. 1 Flow Chart of Fuel Cell Vehicle Capacity Analysis Program

여기서 (-)로 값이 나온 부분은 힘이 (-)값이 아니라 감속 구간으로서 연료전지에서 계속적으로 전원을 보내기 때문에 이를 축전지의 충전에 사용할 수 있는 힘을 나타낸다.

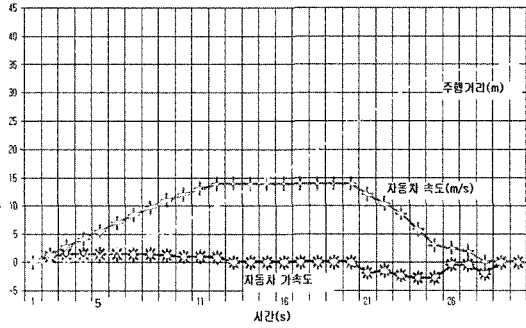


Fig. 2 Driving Course of Fuel Cell Vehicle

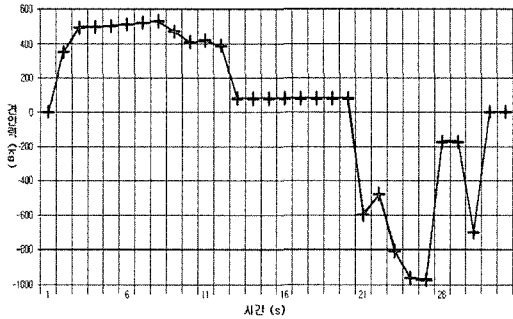


Fig. 3 Traction Power of Fuel Cell Vehicle(Mini-Baja)

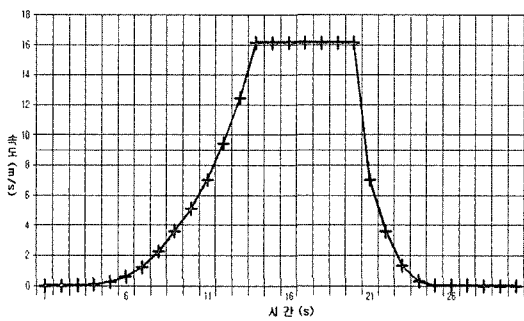


Fig. 4 Transmission Output Velocity of Fuel Cell Vehicle (Mini-Baja)

Fig. 4의 전달출력속도는 전동 출력속도와 전달 비율상수의 곱으로 아래와 같은 결과를 보인다.

Fig. 5는 Fig. 2의 운행 구간에서 자동차의 속도가 변화

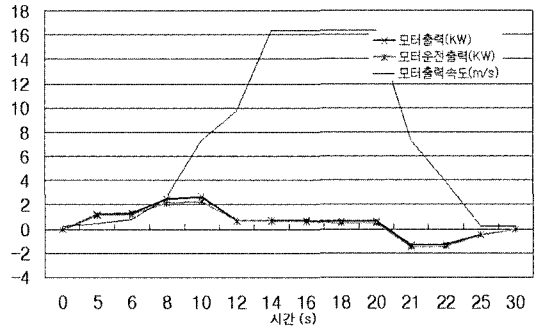


Fig. 5 Motor Output Character of Fuel Cell Vehicle (Mini-Baja)

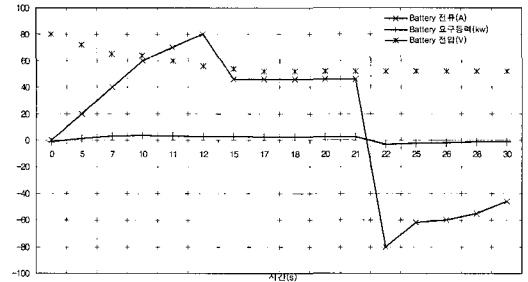


Fig. 6 Battery Output Character of Fuel Cell Vehicle (Mini-Baja)

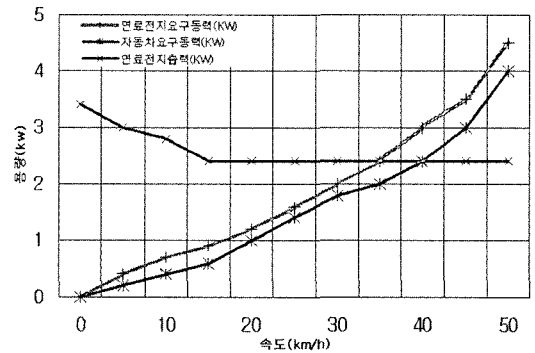


Fig. 7 Capacity of stack as a function of the Velocity

할 때, 모터의 출력 특성을 보여준다. 모터의 출력특성은 Fig. 5에서 나타내는 바와 같이 가속구간에서는 모터의 출력도 증가하고, 감속 구간에서는 감소함을 알 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 2의 운행 구간에서 승용차의 속도가 변화할 때, 축전지의 출력 특성을 보여준다. 축전지 출력 전압은 차량의 속도 변화에 별로 영향을 받지 않고 일정한 전압을 유지하고 있다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 운전초기의 가속 구간에서는 축전지의 출력 전류, 즉 방전 전류가 급격히 증가한다. 이것은 가속에 따르는 부하 부담의 증가로 연료전지에서 공급할 수 있는 동력으로는 자동차의 요구동력을 충족할 수 있으므로 보조 동력원인 축전지에서 필요한 동력을 공급하게 되는 것이다.

Fig. 7은 Fig. 2의 운전 방식에서 소형연료전지 전기자동차가 운행할 때 자동차와 연료전지 스택에서 요구되는 동력이 얼마인가를 보여준다. 소형연료전지승용차는 고속도로가 아닌 도심에서 운행하기 위해서 개발하는 것으로 이 그림에서 살펴보면 연료전지의 정격 출력이 2.4kw이므로, 이때 자동차는 평균 시속 30~40km/Hr의 속도로 운전할 수 있음을 보여준다.

4. 결론

소형연료전지 자동차(Mini-Baja)의 주요 구성품인 전동기, 축전지 및 연료전지의 특성을 파악하고 수학적 모델을 제시하였다. 이를 바탕으로 연료전지 성능해석 프로그램을 작성하여 성능해석을 실시하였다. 주요 결론은 아래와 같다.

- (1) 소형연료전지 자동차의 시스템 설계를 통하여 동력원에 필요한 축전지, 전동기 및 연료전지에 대한 시스템분석 및 수학적 모델을 적용하였다. 축전지를 보조 동력장치로 사용하고 DC 전동기를 사용할 수 있도록 적합한 시스템 분석을 실시하였다.
- (2) 소형연료전지 자동차의 동역학적 다이어그램을 정립하고 성능해석을 위한 프로그램을 Visual Basic을 이용하여 구현하였다. 또한, 실제의 운전경로와 유사한 경로를 설정하여 소형연료전지 자동차의 모델에 적용하여 성능해석을 실시하였다.

- (3) 소형연료전지 자동차의 제한된 출력(2.4KW)에서 도심운전을 위한 경제적인 속도는 30~40km/Hr가 적당하다는 결론을 얻었다.

후기

본 연구의 일부는 산업자원부 한국산업기술재단(KOTEF)의 지원에 따른 지역전략사업 석·박사 연구인력 사업의 연구결과입니다.

참고 문헌

- (1) Pandit, G. P., 1996, "Alternative Fuels in Future Vehicles," *Automotive Engineering*, pp. 39~43.
- (2) Barbir, F., 1998, "Technical Challenges in PEM Fuel Cell Development," *Proceedings of the 12th World Hydrogen Energy Conference Buenos Aires, Argentina*, Vol. 2, pp. 1717~1726.
- (3) *International Energy Outlook*, 1999, Energy Information Administration.
- (4) Kim, H. G., Nah, S. C., Kim, S. C., Kang, Y. W., Yang, G. E., Lee, H. K., and Choi, M. C., 2004, "A Study on the Dynamic Analysis in the Shaft of Turbo-Blower for Fuel Cell," *KSMTE*, Vol 13, pp. 81~87.
- (5) Jiang, R., and Chu, D., 2001, "Stack Design and Performance of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells," *Journal of Power Sources*, Vol. 93, No. pp. 1~2.
- (6) Kim, H. G., Kang, Y. W., and Yu, G. H., 2003, "A Study on the Motor Control System Driven by Battery," *Proceedings of the KSMTE Fall Conference 2003*, pp. 195~200.
- (7) Blomen, L., and Mugerwa, M. N., 1993, *Fuel Cell Systems*, Plenum Press.
- (8) Oh, I. H., 2002, "PEMFC Technique of Vehicle Power," *Hyundai Fuel Cell Workshop*, pp. 97~114.