

연료전지 자동차의 성능해석 및 설계에 관한 연구

김홍건*, 강영우*, 김유신*

Fundamental Study on Performance Analysis and Design of Fuel Cell Vehicle

H. G. Kim*, Y. W. Kang, Y. S. Kim

Abstract

The main objective of the present study is to analyze the feasibility of fuel cell powered vehicle, which leads to carry out system design and performance analysis. The major design concepts which include battery, driving motor, and fuel cell module are analyzed and discussed for the future development. The traction power of fuel cell vehicle is calculated according to the driving courses specified. Further, the fuel cell stack is analyzed to determine the capacity of stack as a function of velocity for the appropriate power required.

Keyword: Fuel Cell(연료전지), Performance Analysis(성능해석), Mini-Baja, Traction Power(견인력)

1. 서 론

최근 에너지 시장에서의 주요한 관심사는 에너지 고갈 문제보다 환경오염의 문제에 초점이 맞추어져 있다. 첫째 화석연료의 사용에 따라 대기로 방출되는 CO₂ 등 온실가스 증가로 인한 기후변화의 가능성, 둘째 자동차의 배기가스에 의한 도시지역의 대기오염, 셋째 이산화황(SO₂), 질소산화물(NO_x), 일산화탄소(CO) 같은 오염물질에 의한 산성화, 마지막으로 원자력 에너지의 사용과 관련한 안전문제가 있다. 지구온난화란 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O)등은 온실가스의

농도 증가로 지구기온이 상승하는 현상인데, 산업화로 인한 화석연료사용량의 증가가 원인으로 지목 받고 있다.

주요 온실가스인 이산화탄소농도가 산업혁명 이전 약 280ppm에서 현재 약 360ppm으로 증가하면서 과거 100년간 지구의 평균온도 역시 0.3~0.6℃ 상승했다는 것이다. 이러한 기온상승은 지금도 전 세계적으로 이상기온과 국지적 홍수 같은 기상이변을 가져오고 있고, 급격한 기온변화에 적응하지 못한 수많은 생물종이 전멸할 것이라는 위기의식이 확산되고 있다^(1,2).

현재 수송부문의 에너지 소모량은 세계 기름 소모량의 48%에 이른다. 1970년 이후 수송부문의 에너지 소모량은 급격히 증가하여 현재는 하루에 18백만 배럴을 소모하고 있다. 2020년에는 하루 소모량이 27백만 배럴에 이를 것으로 예측하고 있다. 자동차의 수는 수송부문 에너지 소모량의 가장 많은 비율을 차지하고 있다. 세계자동차수는

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

1996년 425백만대에서 2020년에는 110억대에 이를 것으로 예측된다. 미래의 환경오염이 심각해지고 기후의 변화가 심각해지면서 세계각국은 환경오염의 방지를 위해 환경오염의 기준을 강화하고, 대체연료차량 및 무공해 차량의 보유 비율을 의무화하고 있고 저공해, 무공해 차량의 개발에 대한 지원과 무공해 차량의 운운행시 세계 감면 등 자동차에 의한 환경오염을 줄이기 위한 노력을 하고 있다.

미래의 에너지원은 환경에 영향을 미치지 않고 고갈의 문제가 없는 에너지원이어야 한다. 태양에너지, 수력, 풍력 등의 에너지원은 열, 전기와 같은 유용한 에너지의 형태로 전환되거나, 수소와 같은 화학적 에너지 매개체로 변환되어 사용된다. 수소의 이점은 청정에너지의 가장 이상적인 매개체라는 것이다. 수소는 태양에너지나, 풍력, 수력 등의 청정에너지원으로부터 생산된 전기에너지로부터 물의 분해를 통하여 얻게 된다. 수소가 연소되거나 전기로 변환되어도 직접적인 산출물은 물이다. 이것은 환경에 완전 무해하고 다시 사용될 수 있다.

연료전지는 연료의 화학에너지를 전기에너지로 전환시키는 셀의 집단으로 정의되며, 일반적으로 이온 전해질에 의해 분리된 2개의 촉매로 피복된 전극으로 구성되어 있다. 연료전지 발전은 공해를 거의 발생하지 않기 때문에 에너지 절약 및 공해 저감요구에 부응할 수 있는 자동차 엔진으로 주목받게 되었다. 일례로 연료전지는 세계에서 가장 엄격한 자동차 공해 규제안인 캘리포니아 로스엔젤레스의 공해 규격치 보다 훨씬 아래에 있다⁽³⁾.

연료전지 자동차의 핵심기술은 연료전지와 배터리의 연계 운전에 의해 동력을 공급하는 엔진 부로서 부하의 증가/감소에 따른 변화에 쉽게 동력을 공급할 수 있고, 더불어 에너지의 이용 효율을 극대화시킬 수 있는 효율적인 설계 및 제어시스템의 구현이 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 가장 효과적으로 개발될 수 있는 연료전지 자동차의 적절한 부하해석, 성능해석 및 설계조건 등을 검토하였으며 소형연료전지 자동차의 시스템을 설계하였다. 그리고 연료전지 자동차의 동력원으로 선정된 고분자전해질 연료전지(PEMFC)를 주동력원으로 하고 축전지를 보조동력원으로 사

용하는 복합구동 승용차의 성능해석을 수행한 후 이에 따른 성능해석용 프로그램을 개발하여 그 결과를 고찰하였다.

2. 연료전지 시스템

외부에서 연속적으로 공급되는 연료(Fuel)와 산소의 전기 화학적 반응에 의해 연료가 가지고 있는 화학 에너지를 전기에너지로 변환시켜주는 장치이다. 연료전지는 원리상 열기관이 가지고 있는 제한 즉, Carnot 효율에 제한되지 않고 매우 높은 효율을 가질 수 있는 장치이다. 물의 전기분해 반응의 역반응과 같다. 연료로서는 주로 천연가스로부터 쉽게 생산해 낼 수 있는 수소와 공기중의 산소가 사용된다⁽⁴⁾. 수소와 산소는 각각 양극과 음극에서 전자를 주고받는 반응에 참여하게 되는데, 양극에서 음극으로 흐른 전자를 이용하는 것으로서 이때 양극과 음극에서 일어나는 전극반응은 다음 식(1)~(3)과 같고 연료전지 원리는 그림 1과 같다. 한 쌍의 양극과 음극에서 발생하는 전기의 세기는 약 1.2 Volt 정도로서 매우 약한 것이다.

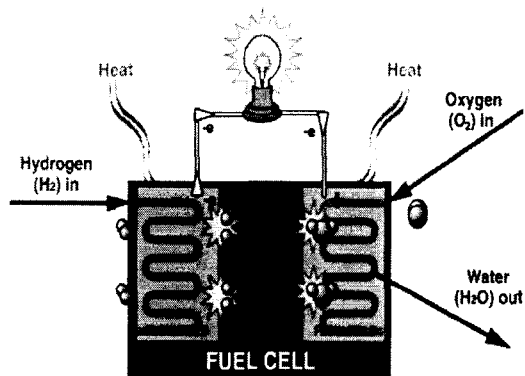
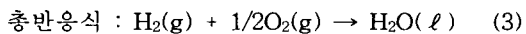
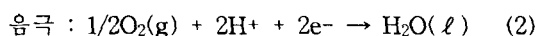
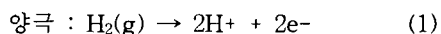


Fig. 1 The Principle of Fuel Cell

3. 연료전지 자동차의 시스템 설계

(1) 축전지의 시스템 설계

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 나타내 진다.

축전지의 종단 전압은 충방전 전류의 함수로서, 충방전 전류가 일정할 경우에 실제 축전지의 개방 전압과 내부저항 그리고 충전상태(SOC)의 함수이다 실험에 기초하여 많은 관계식들이 주어지고 있는데, 일반적으로 내부 저항은 충전 상태에 반비례하므로 다음과 같이 정적 상태의 축전지의 모델 식 (4)를 구할 수 있다

$$e_{tb} = V_{OC} - (R_b + \frac{K}{SOC}) i_{tb} \quad (4)$$

e_{tb} = 축전지의 종단 전압, V_{OC} = 개방회로 전압

R_b = 축전지의 종단저항. K = 분극저항

i_{tb} = 축전지의 충방전 전류

축전지 충전상태 S 는 아래의 식(5)와 같이 시간에 대한 전류의 적분과 축전지 용량 C 에 관계된다.

$$S = S_0 - \int_0^T \frac{I_{BI}(t)}{C} dt \quad (5)$$

여기서 S_0 는 초기 충전상태, T 는 총시간이다. 적분은 평균전류 $ICUR$ 과 총 시간의 곱과 같으므로 S 를 아래 식(6)과 같이 표현할 수 있다.

$$S = \frac{S_0 - ICUR \times T}{C} \quad (6)$$

하이브리드 프로그램은 축전지 용량에 대한 지수함수모델과 선형함수모델을 혼합한 것이다. 지수함수모델은 관형 축전지에 적합하고, 황-나트륨 축전지와 니켈-카드늄 축전지 등은 선형함수 모델이 잘 맞는다. 축전지용량 C 에 대한 선형함수 모델은 아래 식(7)과 같다.

$$C = C_0 \times [B_0 + B_1 \times (\frac{ICUR}{I_0})] \quad (7)$$

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

(2) 전동기의 시스템 설계

연료전지와 축전지에서 자동차의 구동원인 전동기로 전력을 공급한다. 구동시스템의 주요 설계시 고려할 사항은 가격, 효율, 동력밀도이다. 그리고, 전동기의 제어 시스템도 설계 요소이다. 초기 단계의 연료전지자동차는 전기자동차에서 얻은 경험을 이용하여 설계됨이 바람직하다는 점은 알고 있다. 전기자동차에서는 직류와 교류 전기 모터를 사용하고 있다. 전동기의 모델은 회전자 초퍼 모드나 약전 계자 모드로 운전되는 분리된 여자 직류모터에서 예측한다. 형태는 모터의 기본속도와 같거나 적은 모터 출력속도에 의해 특성화되었다. 모터의 기년 입력은 축전지에서 공급되는 전류량으로써 구동 토크를 생성한다. 직류모터의 입출력 특성에 의한 개통식은 보통 다음과 같은 식들로 나타내고 있다⁽⁵⁾.

$$\frac{di_a(t)}{dt} = \frac{1}{L_a} e_a(t) - \frac{R_a}{L_a} i_a(t) - \frac{1}{L_a} e_b(t) \quad (8)$$

$$T_m(t) = K_i i_a(t) \quad (9)$$

여기서

$i_a(t)$ = 전기자 전류, R_a = 전기자 저항,

$T_L(t)$ = 부하 토크, $T_m(t)$ = 모터토크,

K_i = 토크정수, L_a = 전기자인덕턴스

(3) 연료전지 모듈의 시스템 설계

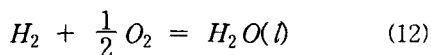
시스템 분석은 시스템 전체를 이해하기 위해 열이나 에너지의 정산에 대한 이해가 필요하다. 연료전지 주위의 에너지 정산은 열 입·출입, 출력, 반응, 열 손실 등 연료전지에서 생기는 에너지의 요소에 기초를 한다. 에너지 변환장치의 열효율은 저장된 화학적 에너지의 변화에 대한 연료가 산화제와 함께 반응할 때 나오는 유용한 에너지의 생산량으로 정의된다^(6,7).

$$\eta = \frac{\text{Useful Energy}}{\Delta H} \quad (10)$$

연료전지와 같은 이상적인 전기 화학적 변환기에서 어떤 변환 온도에서 Gibbs 자유에너지 변화가 유용한 전기에너지의 생산에 이용된다. 비가역적으로 작동할 때 연료전지의 이상적인 효율은 다음식(11)과 같다.

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (11)$$

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.

4. 소형 연료전지 자동차 성능해석

소형 연료전지 자동차 성능해석에 대한 개념도는 아래 그림 2와 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. 프로그램에서 어느 주어진 시간에 자동차의 위치와 속도는 다음 시간 간격 동안 요구되는 자동차 가속력을 결정하도록 묘사된 경로 시그먼트에서 조사된다. 도로에서 필요로 하는 견인력은 출력 속도와 토크의 운전시스템으로부터 요구되는 출력이 유일하게 고정되어 계산되었다.

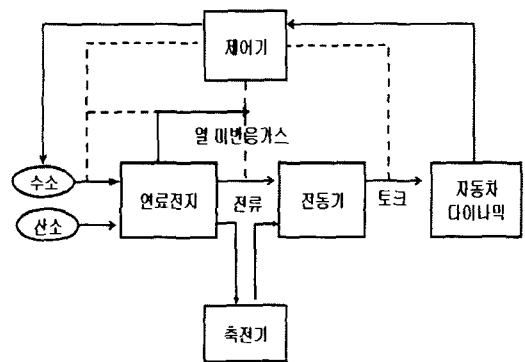


Fig. 2 A Concept Diagram of Fuel Cell Vehicle System

운전에서 모든 손실은 필요한 출력을 산출하는 운전 입력과 토크에서 결정되어 계산되어졌다. 연료전지 특성으로는 기본 연료전지 전압-전류

특성곡선을 기준으로 하였다. 연료전지 자동차에 대한 성능 해석은 그림 2의 흐름도에 제시한 것과 같이 먼저 운전경로를 설정하고, 그 경로에서의 각 구획마다 자동차에서 요구하는 견인력을 구하여 연료전지나 축전지에서 공급할 수 있는 동력원을 계산한다. 그림 3은 소형연료전지 승용차가 운행하는 기본적인 운전 경로로써, 일반적인 운전 방식이 그러하듯이 가속 구간, 정속 구간, 감속 구간의 세 단계로 구분되어 있는 운전 방식을 보여준다. 거의 모든 운전 방식은 그림 3의 운전 방식의 응용이라고 생각할 수 있다. 그림 4는 그림 3의 운전 방식에서 소형 연료전지 전기자동차가 운행할 때 자동차와 연료전지 스택에서 요구되는 동력이 얼마인가를 보여준다.

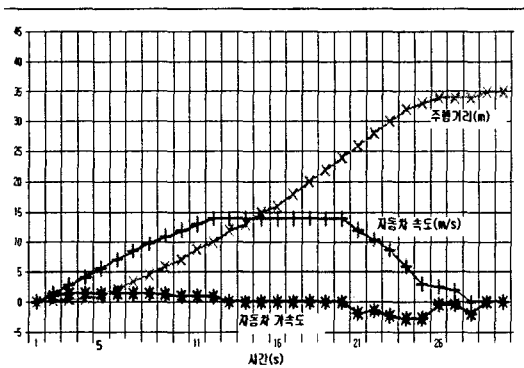


Fig. 3 A Driving Course of Fuel Cell Vehicle

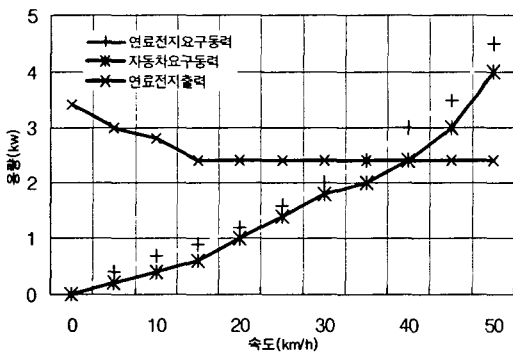


Fig. 4 A Capacity of stack as a function of the Velocity

소형 연료전지 승용차는 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.

5. 결 론

소형 연료전지 자동차의 시스템 설계를 실시하여 연료전지의 기본 개념 및 연료전지 자동차의 특성을 파악하였고, 주요 구성품인 전동기, 축전지 및 연료전지의 특성을 파악하고 수학적 모델을 제시하였다. 이를 바탕으로 연료전지 성능해석 프로그램을 작성하여 성능해석을 실시하였다. 주요 결론은 아래와 같다.

- (1) 소형 연료전지 자동차의 시스템 설계를 통하여 동력원에 필요한 축전지, 전동기 및 연료전지에 대한 시스템분석 및 수학적 모델을 적립하였다. 축전지를 보조 동력장치로 사용하고 DC 전동기를 사용할 수 있도록 적합한 시스템 분석을 실시하였다.
- (2) 소형 연료전지 자동차의 동역학적 다이어그램을 정립하고 소형 연료전지 자동차의 성능해석을 위한 프로그램을 Visual Basic을 이용하여 구현하였고, 실제의 운전경로와 유사한 경로를 설정하여 소형 연료전지 자동차의 모델에 적용하여 성능해석을 실시하였다.
- (3) 소형 연료전지 자동차의 제한된 출력(2.4KW)에서 도심운전을 위한 경제적인 속도는 30~40km/Hr가 적당하다는 결론을 얻었다.

후 기

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

참 고 문 헌

- (1) V. M. Schmidt and U. Stimming, Germany 23-28 June 1996, "Hydrogen and Methanol Proton Exchange Membrane Fuel Cells." , *Proceedings of the 11th World Hydrogen Energy Conference Stuttgart*, Vol. 3, pp.1717- 1726
- (2) J. Friedrich and K. E. Noreikat, Germany 23-28 June 1996, "State of the Art and Development Trends for Fuel Cell Vehicles" , *Proceedings of the 11th World Hydrogen Energy Conference Stuttgart*, pp.1757- 1766
- (3) Yang W. C., 2000, "Fuel Cell Electric Vehicles : Recent Advances and Challenges-Review" *KSAE*, Vol. 1, p9-16
- (4) Jiang, R. and Chu D., 2001, "Stack Design and Performance of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells", *Journal of Power Sources*, Vol. 93, No. 1-2.
- (5) H. G. Kim, Y. W. Kang and G. H. Yu, 2003, "A Study on the Motor Control System Driven by Battery" , *Proceedings of the KSMTE Fall Conference 2003*, p195-200
- (6) Blomen, L. and Mugerwa, M. N., 1993, *Fuel Cell Systems*, Plenum Press
- (7) 오인환, 2002, "자동차 동력용 PEMFC 기술" , *현대자동차 연료전지 워크숍 발표자료집*, p 97- 114.