

연료전지 자동차의 동력원 설계 및 해석

이 봉 도, 이 원 용, 신 동 열

한국에너지기술연구소

Design and Analysis of Fuel cell Systems for Vehicles

Bong-Do Lee, Won-Yong Lee, Dong-Ryul Shin

Korea Institute of Energy Research

1. 서 론

연료전지는 연료의 화학에너지를 열변환 없이 직접 전기에너지로 변환시킬 수 있는 시스템으로써, 기존의 동력장치에 비해 고효율이고 공해물질을 거의 배출하지 않으며 다양한 연료를 사용할 수 있는 장점이 있다. 이러한 장점을 자동차에 적용시킴으로써 에너지 절약 및 환경 공해 문제의 해결을 위한 연구가 선진 각국에서 활발히 진행되고 있다.

연료전지 자동차를 설계하기 위해서는 자동차의 개념 설계와 설계된 자동차의 기술적인 성능 검토를 위한 전산 해석이나 제작 실험에 의한 검증이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 먼저 연료전지 자동차 동력원의 용량, 크기 및 종류 등에 대한 개념적인 설계를 수행하였고, 설계된 제원을 실제 자동차에 적용하기에 앞서 간이화된 전산 해석 프로그램을 개발하여 설계된 자동차에 적용하여 성능 검증을 실시하였다. 이 결과를 실제 연료전지 자동차의 설계에 적용할 경우 시행착오 없이 최적의 부품 구조, 용량 등을 결정하기 위해서 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

2. 본 론

2.1 연료전지 자동차의 동력원 설계

연료전지 자동차의 동력장치는 연료전지, 연료개질기, 보조 축전지, 전동기 및 보조 장치로 구성되어 있다. 연료전지 본체는 화학에너지를 전기에너지로 변환시키는 요소로써 연료가 주입되어 자동차에서 필요로 하는 동력을 발생시키는 종합시스템이다. 연료전지는 사용되는 전해질의 종류에 따라 여러 가지로 구분한다. 자동차용 연료전지의 선정을 위해서는 연료전지의 기술 개발 상태, 자동차의 동력원으로써의 출력 동력 밀도, 자동차 탑재시의 운전 온도, 사용 연료의 종류 및 급유의 용이성, 연료 개질 장치의 이용 가능성, 개발 비용 및 유지 보수비용 등의 구성 요소들을 고려하여야 한다. 이러한 여러 가지 특성 및 장단점을 비교 분석하여 승용차용 연료전지로는 고분자전해질형 연료전지가 적합한 것으로 판단되었다.

연료개질기는 탄화수소 연료를 적당한 온도에서 탄소와 수소로 분리하여 연

료전지에 연료를 공급하는 장치이다. 이러한 개질 장치들은 개질 공정과 연료의 형태에 따라 연료 준비 단계, 개질 단계, 차기 개질 단계로 구분되며, 여기에는 수증기 개질, 부분 산화 개질 및 자동 열분해 개질 방법 등이 있다. 각각의 개질 방법에 대한 특성 및 장단점을 검토하여 연료전지 자동차용 개질 방법으로는 수증기에 의한 메탄올 개질 방법을 선택하였다.

자동차의 동력원인 연료전지는 축전지와 연계되어 정상상태에서는 연료전지로 자동차를 구동하면서 일부의 전력을 축전지에 충전해 두었다가, 시동이나 가속시와 같이 급격한 동력을 필요로 할 때에는 축전지의 동력을 사용하는 방식으로 설계되었다. 고분자전해질 연료전지는 저온에서 작동되는 관계로 일산화탄소 성분에 약하므로 수소연료가 연료전지에 들어가기 전에 일산화탄소 성분을 제거해야 한다. 축전지는 자동차용으로 개발되어 있는 모델이 여러 가지가 있는데 각각의 특성 및 장단점을 고려하여 자동차에서 요구하는 동력을 제공할 수 있고 연료전지 스택에서 공급되는 진원에 의한 재충전이 가능한 것으로써 축전지의 충방전 특성을 고려하고 선정하였다.

연료전지 자동차의 동력원 설계를 위해서는 에너지 이용율, 유해가스 발생 및 정화, 가격과 여러 가지 재료의 이용 가능성, 국민 취향과 가족 규모, 그리고 많은 다른 경제적, 사회적 그리고 정책적 요인들이 영향을 주고 있다. 또한 순수 수소나 메탄올 개질 등의 연료 공급 방법, 구동 모터 및 제어 시스템의 성능 및 크기, 전력 저장을 위한 배터리의 크기 및 종류 등을 자동차의 설계와 응용에서 반드시 고려되어야 한다. 이러한 여러 가지 요인들을 고려하여 개념 설계한 연료전지 자동차 동력원의 시스템 제원은 <표 1>과 같다.

<표 1> 전체적인 연료전지 승용차용 동력원 시스템의 제원

연료 전지	종류	PEMFC	개질기	종류	메탄올수증기개질기	
	활성면적(cm ²)	530		크기(mm)	21 ℓ (L340×D280)	
	최대전류밀도 (mA/cm ²)	800		무게(kg)	60	
	셀 전압(Volt)	0.67		축전지	종류	Non-sintered Ni-Cd
	셀 수	105			전지 셀 수	60
	정격출력(kW)	30			용량(Ah)	200
	크기(mm)	55×25×25			에너지(kWh)	16
	무게(kg)	40			크기(cm) (5셀 모듈)	18.4W×60L×24.8H
		무게(kg)	160			
전동기	종류	초퍼제어직류모터				
	크기(mm)	23 ℓ (L360×D300)				
	무게(kg)	75				

2.2 연료전지 자동차의 제어기 설계

부하 제어를 위한 연료전지/배터리 복합 구동 동력원에 대한 시스템을 설계하

였다. 연료전지 자동차는 연료전지와 배터리의 부하 분담 특성을 파악하는 것이 가장 중요한 핵심 기술이다. [그림 1]은 연료전지 자동차 시스템에 적용할 연료전지/배터리 복합 구동 동력원의 동력 시스템 제어 계통도를 보여주고 있다. 제어장치는 축전지의 잉여저장량(신호 7)과 부하명령(가속신호량 : 신호 10)에 비례하는 현재 전력소비량(신호 8)으로부터 메탄올 연료 공급 조절 밸브와 공기 조절 밸브를 조절하여 연료전지의 출력을 조절하고 자동차를 구동하는데 필요한 전력을 제공하도록 해야한다. 즉 연료전지에 공급되어야 하는 연료량을 계산하여 연료제어부에 메탄올 공급 조절 신호를 보낸다. 연료전지 제어 장치는 DC/DC 콘버터를 조절하여 연료전지의 출력 전력을 제어한다. 그러나 제어 시스템에서는 다음의 사항이 준수되도록 제어하여야 한다. 첫째, 연료전지는 부하에 따라 전동기에 전력을 공급하는 가변 전원 공급 장치로 작용하지만, 자동차가 빠르게 가속되거나 부하가 증가하거나 하는 경우는 배터리가 연료전지의 모자라는 출력을 보충하는데 사용되어야 하고, 경부하구간 동안 연료전지로부터 전력을 충전받도록 하여야 한다. 둘째, 연료전지의 출력제어는 가능한 고효율(30-40%)을 유지할 수 있도록 동작되어야 하고, 배터리는 과방전에 의한 수명저하가 발생되지 않도록 동작되어야 한다.

2.3 연료전지 자동차 해석

연료전지 자동차에서 기본적으로 이용되는 동력은 전동기에서 발생하는 토오크로써 연료전지 혹은 축전지에서 공급하는 전류량에 따른다. 전동기의 속도는 입력 전압과 선형적 관계에 있다. 전동기의 기본 입력은 연료전지나 축전지에서 공급되는 전류량으로써 자동차의 구동 토오크를 생성해 낸다. 전동기의 회전자 전류와 회전자 전압을 위한 회전자 초퍼 모드에서 출력 토오크는 회전자 전류 및 전압과 배터리 출력 전압이 전동기의 출력 속도와 토오크에 일치되도록 하여야 한다. 이때 일반적으로 회전자의 입력 전압은 배터리의 출력 전압과 같다.

축전지는 입출력 변수가 모두 전류의 형태이다. 축전지의 충방전 특성은 축전지의 상태, 충전 능력, 충방전의 비율, 주위 온도 및 수명에 따르는 시간의 함수이며 그 관계는 매우 복잡하다.

연료전지는 연료개질기에서 공급하는 개질 수소를 이용하거나 외부 공급용 순수수소를 이용한다. 공급 수소는 연료전지 스택내에서 산소와 반응하여 전류와 열을 생성하고 미반응가스는 회수되어 다시 이용된다. 이러한 기본적인 동작원리를 기초로 하여 각 부품의 수학적 모델 및 연료전지 자동차의 성능을 해석할 수 있는 프로그램을 작성하였다. 수학적 모델링은 [그림 1]의 연료전지 자동차 시스템 제어 계통도에 근거한 입력 인자와 출력 인자 사이의 관계를 기초로 한다. 즉 출력측의 요구사항을 먼저 정립한 후에 입력측의 조건을 만족시키도록 전동기, 축전지, 연료전지, 연료개질기의 순서로 모델링을 진행하였다.

자동차의 구동에 필요한 동력은 뉴우톤의 운동법칙에 의하여 간단히 나타낼 수 있고, 연료전지/축전지 복합 구동 자동차에서 축전지의 특성식은 다음과 같다.

$$VB = VB10(S) - IB1 \times RB1(S)$$

$$PB0 = \frac{VA \times IA}{UCA} + \frac{PACC1}{UCV} + PACC2 + \frac{PFL}{UCF}$$

$$IB1 = \frac{VB10 - \sqrt{VB10^2 - 4 \times RB1 \times PB1}}{2 \times RB1}$$

$$S = SO - \int_0^T \frac{IB1(t) dt}{C}$$

$$C = C0 \times \left(\frac{IBAR}{I0} \right)^a \times f \left(\frac{IBAR}{IBMAX} \right)$$

(여기서 VB 는 배터리 전압, $PB0$ 는 배터리 출력, $IB1$ 은 배터리 전류, S 는 배터리 충전 상태, C 는 배터리 용량이다.)

2.4 성능 해석

자동차 성능 해석을 위하여 외부의 부하조건인 자동차의 속도와 도로의 구배 조건 등이 입력되었으며 출력으로는 자동차가 요구되는 동력과 각 부품에서 담당해야 할 부하의 동력, 전압 및 전류를 계산하도록 하였다. 이 연료전지 자동차 성능 해석 프로그램은 자동차가 짧은 구간을 운행할 때의 출발에서 정지할 때까지의 결과를 해석한 것이다. [그림 2]는 성능 해석 프로그램 흐름도이다. [그림 3]은 연료전지 자동차의 해석을 위해 사용된 기본 운전 방식으로써 대표값인 속도 상승 단계, 정상 운행 단계, 감속 단계로 구분된다. [그림 4]와 [그림 5]는 자동차의 운행 속도에 따른 배터리의 출력 특성과 구동 모터의 출력 특성을 보인 것이다. [그림 6]은 속도 변화에 따른 자동차의 요구 동력 변화를 보인 것으로써, 자동차의 속도 45km/h까지는 연료전지 단독에 의한 운행이 가능함을 알 수 있고, 속도 100km/h에서 270HP의 동력이 요구되는데, 이 결과는 일반 버스에서 요구하는 동력 수준과 거의 일치함을 알 수 있었다.

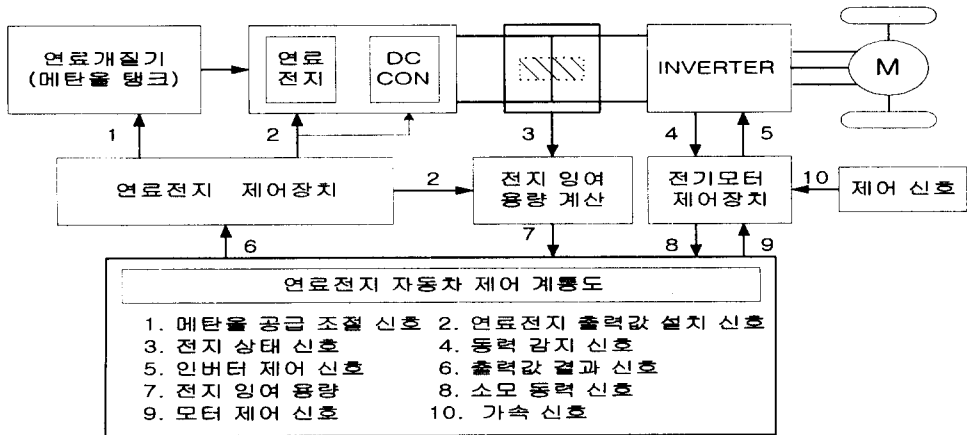
3. 결 론

자동차에 연료전지를 적용할 경우 기존의 내연기관에 비하여 고효율이고, 다양한 대체 연료를 사용할 수 있으며, 공해와 온실가스를 대폭 줄일 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 연료전지/축전지를 복합 구동원으로 한 자동차를 개념 설계하여 이에 대한 성능 해석을 수행하였다. 축전지는 외부 전원의 공급없이 연료전지의 출력만으로 운행중에 충전되도록 하였으며, 순간적인 동력의 변화를 담당하도록 하였다. 정격 부하시에는 연료전지가 모든 부하를 공급하도록 하였다.

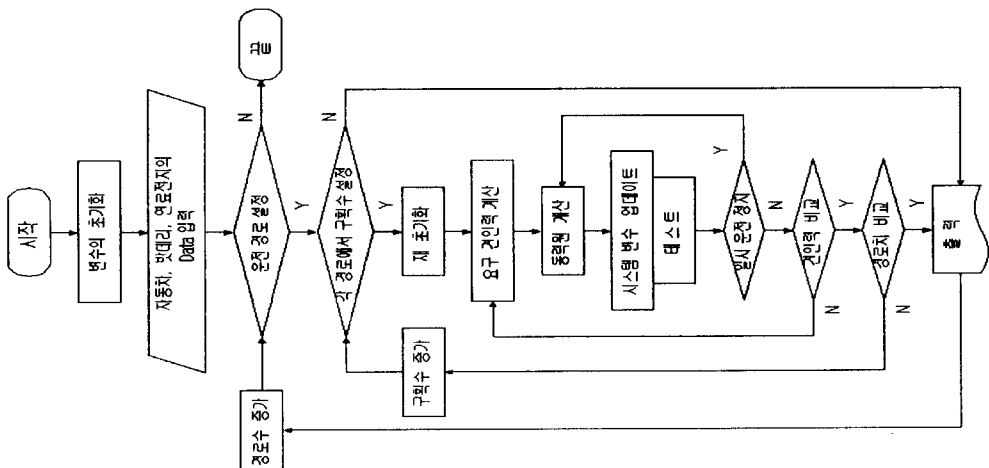
자동차 부하조건에 따른 자동차의 요구동력과 이에 따른 전동기, 축전기, 연료전지에 대한 입출력 성능을 산출하여 전체적인 자동차의 성능을 분석하였다. 주어진 운전 범위 내에서 설계된 전체적인 시스템이 정상적으로 작동되는 것을 검증할 수 있었으며, 이 프로그램이 연료전지 자동차 설계에 유용하게 사용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

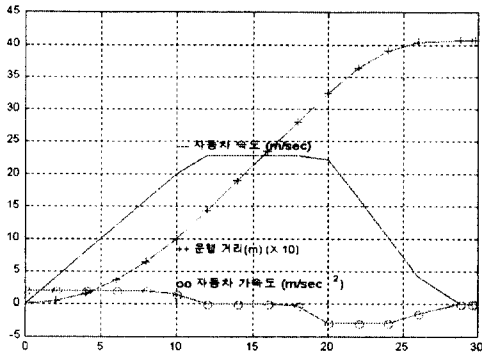
- [1] 이봉도, 이원용, 신동열, "인산형 연료전지/축전지 복합 구동 자동차 개념 설계", 연료전지연구회 '96 학술 발표회 논문집, 3권 1호, pp 39-41.
- [2] P.Frantzeskakis, T.Krepec, and S.Sanker, "Specific Analysis on Electric Vehicle Performance Characteristics with the Aid of Optimization Tecchniques", Advancements in Electric and Hybrid Electric Vehicle Technology, No.940336, pp47, 1994.
- [3] Scott A. Munns, "Computer Simulation of Powertrain Components with Methodologies for Generalized system Modeling, Univ. Wisconsin-Madison, 1996.



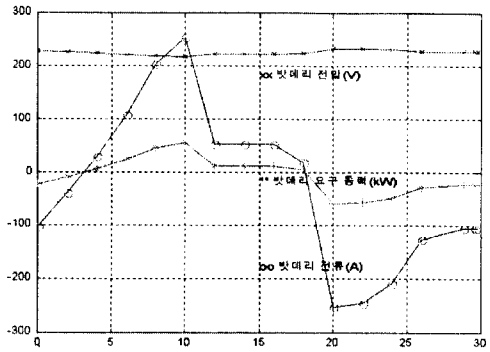
[그림 1] 연료전지 자동차 시스템의 동력 장치 제어 계통도



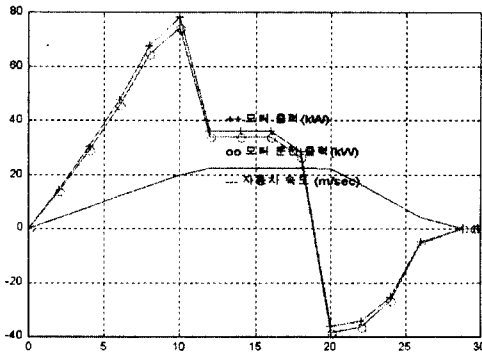
[그림 2] 연료전지 자동차 성능 해석용 프로그램 흐름도



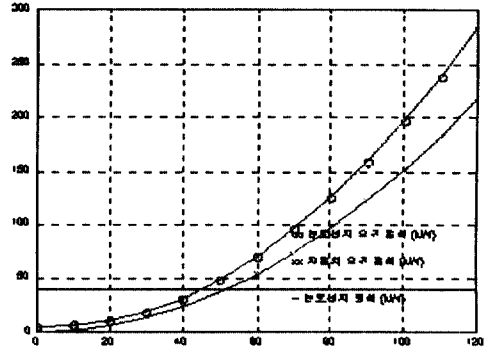
[그림 3] 연료전지 자동차 기본 운전 경로



[그림 4] 속도 변화에 따른 배터리 출력 특성



[그림 5] 속도 변화에 따른 모터 출력 특성



[그림 6] 속도 변화에 따른 연료전지 요구 동력 특성