

경부하 FC 하이브리드 자동차의 구조와 특성에 관한 연구

봉 태 근†

(원고접수일 : 2007년 7월 13일, 심사완료일 : 2007년 9월 3일)

A Study on the Structure and Characteristics of Light-duty FC Hybrid Vehicle

Tae-Keun Bong†

Abstract : Global primary energy demand is projected to increase by 1.7% per year from 2000 to 2030. Almost three-quarters of the increase in demand will come from the transportation sector. Fuel cell hybrid vehicle technology has the potential to significantly reduce energy and harmful emissions, as well as our dependence on foreign oil. In this paper, a systematic and logical methodology is developed and improved mainly to design light duty fuel cell hybrid electric vehicle. We investigated structure and characteristics of light duty FC hybrid vehicle carefully. It can easily be expanded to analyze vehicle-to-grid power connectable plug-in NeHEV. A fuel cell hybrid neighbourhood electric vehicle configuration has been studied in-depth utilizing the proposed methodology.

Key words : Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle(연료전지 하이브리드 자동차), State of charge (초기충전상태), FUDS(연방 도심 주행모드)

1. 서 론

Campbell 등^[1]은 수년간 전 세계적으로 수집한 통계적 자료와 가까운 장래의 예측을 바탕으로 원유생산은 2000년대의 첫 20년 동안 최고 생산치를 기록하다가 줄어들 것이라고 예상하였다. 또한 국제에너지기구의 2004년 세계에너지 예측 자료^[2]에 의하면 연료의 수요도 상승폭이 커질 것으로 예상하고 있다.

석유계 연료를 효율적으로 사용하기 위해서 동력전달 기구의 효율을 향상하기 위한 많은 노력이

있었다. 그러나 최근에 연료를 절약하기 위해서 여러 나라에서 운전자의 운전 방법에 대한 분석이 이루어지면서 하이브리드화된 전동기 형태를 갖춘 경부하 통근 자동차와 같은 시도가 활발히 논의 되고 있다.

연료전지 동력전달기구는 막전해질의 평균수명을 증대시키는 새로운 촉매제의 대체문제, 제품에 대한 인프라의 문제, 수소연료의 안전 저장, 효과적인 가격 등 여러 가지 문제를 안고 있으나 가장 유망한 동력전달기구의 해법중의 하나가 될 것이다.

교통안전공단의 자료^[3]에 의하면 우리나라 자가

† 교신저자(북포해양대학교 기관시스템공학부), E-mail: tgbong@mmu.ac.kr, Tel: 061)240-7100

용 승용차의 1대당 1일 평균운행거리는 44.34km에 지나지 않았다. 차⁽⁴⁾의 연구에 의하면 자가용 승용차의 출퇴근 시 평균 탑승인원은 1.3명에 불과하고, 출퇴근용 편도거리는 14.1km 라고 발표하였다. 또한 자가용 승용차의 사용은 출퇴근용이 49%, 업무용이 22%, 가사용이 29%로 조사되었다. 이와 같은 상황에서 적절한 규모의 차량을 운행한다면 연료절약 및 배기가스 감축에 큰 효과를 볼 수 있을 것이다.

가구에 있는 차량중 1대는 도심중심지 근처의 통근용으로나 지역 내의 쇼핑용으로 사용된다는 추론을 할 수 있다. 이러한 환경 하에서, 저속도 차량(LSV)이나 근린전기자동차(NEV)는 특별히 가정의 세컨드 카나 써드 카로서 지역 도시운송수단의 해법으로 인식 할 수 있다. 더욱이, 연료전지 전동구동이나 NiMH나 Li-ion 이차전지와 대용량 캐퍼시터와 같은 에너지 저장 시스템, 한층 정교한 하이브리드 연료전지 형태는 친환경적이고 자기유지형 수송개념과 경쟁하는 자동차-송전 플러그인 개념과 같은 수단을 제공할 것이다. 최근에 공표된 FCHEV(fuel cell hybrid electric vehicle)는 석유사용량을 약간 감소시킬 수 있으며, PFCNEVs(plug-in fuel cell neighborhood electric vehicles)는 그 이상 사용을 절감할 것이라고 한다. PFCHEV(plug-in fuel cell hybrid electric vehicle)나 PFCHNEV(plug-in fuel cell hybrid neighborhood electric vehicle)를 사용함으로 석유사용의 획기적인 감소는 없지만 배기관에서의 청정 배기가스는 도시근교의 환경 조절에 크게 기여할 것이다.

FCHEV를 설계하기 위해서 체계적 방법이 발전되어 왔고, Guezennec 등⁽⁵⁾은 자동차-송전 플러그인 형태를 고안하였다. 이 방법을 이용하여 하부구성요소의 적당한 크기가 예측된다. 고안된 하이브리드 동력기구는 하나 혹은 둘의 공기냉각 PEMFC(polymer elctrolyte fuel cell)와 함께 상업용으로 사용되는 경자동차(마티즈)에 설치되었다. 연료자동차시스템의 개선에 앞서, 축소형 시험 모델로 실험하였다. 이 논문에서는 시험대 모델의 자세한 내용을 기술하였으며 그 결과도 제시

하였다.

2. 구성요소의 특성

초소형 자동차에 장착 되어 있던 내연기관과 트랜스미션을 PEM 연료전지 시스템과 DC/DC 컨버터와 NiMH 이차전지 팩, 그리고 구동모터와 모터 제어기로 대체하였다. 새로운 전동 기구의 형태의 개념도는 Fig. 1과 같다.

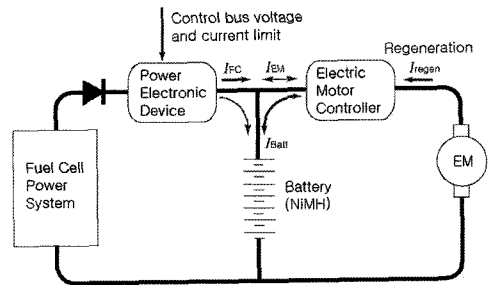


Fig. 1 Fuel Cell Hybrid Power train System Configuration

모터컨트롤러는 직접 72V NiMH이차전지 팩에 연결되며 전압을 올리는 DC/DC 컨버터는 연료전지시스템의 출력을 이차전지 팩에 연결하는데 사용하고 이 경로로부터 전류를 조정한다. 이 연구를

Table 1 Vehicle Specification (GM-Daewoo Matiz) with 2.4kW PEMFC Power System and 10 packs of NiMH Batteries

Symbol	Item Description	Value
m_v	Curb weight w/o battery, engine, and transmission	665kg
m_b	Battery weight	174.0kg
Motor	GE Shunt DC 72v motor with controller	rated 45kW
m_{GVW}	GVW(Gross vehicle weight)	1217kg
m_p, n_p	Passengers weight and number	280kg, 4 passengers
A_f	Frontal area	2.5 m ²

위해 선택된 구성품은 상용으로 유용한 구성품이나 부품용 기초로 선택하였고, 이것들은 실험적으로 특성화하였다. 이 규모의 연구목적을 위해서 이 구성품의 특성은 적당히 축척하였다. 이러한 변경을 고려한 기본적인 자동차 사양은 Table 1에 기록하였다.

사용된 주행모드는 FUDS(Federal Urban Drive Schedule)로서 NYCC(New York City Cycle)에 비해 최고속도와 평균속도는 높고, 출발과 정지도 상대적으로 적으며 교통신호에 의한 정지해 있는 시간도 짧은 교통환경을 나타낸다. 이 정규운전 사이클은 91.2km/hr의 최고속도, 31.62km/hr의 평균속도를 나타내고 있다.

FUDS는 NYCC 보다는 속도변동이 적은 편이며 평균속도가 최고속도의 절반에 미치지 못하고 속도 0에서 소비한 시간은 4600초를 기록하고 있다. 다음 절에서 보는 바와 같이, 이 속도 통계치는 동력분포에 대한 중요한 함축된 의미를 갖고 있다.

이러한 운전 사이클(시간의 함수로서의 속도)과 속도사양으로, backward(역행) 시뮬레이션(주어진 속도추적을 추종하기 위해 필요한 휠에서의 동력요구를 계산)은 자동차에 대한 에너지와 동력분석의 수치를 구하기 위해 사용되었다. 이 연구를 위해서, 간단한 시뮬레이터가 이 모델링 접근을 수행하기 위해 매트랩(Matlab)으로 작성되었다. 휠에서의 정미 구동력은 가속과 감속에 대한 요구되는 관성력, 경사에 의한 힘, 공기역학적인 끌림, 구름저항 등을 고려해 추정된다.

연료전지 시스템은 발라드(Ballard)사의 넥사(Nexa™ PEM) 연료전지 시스템이다. 이 시스템의 정격 정미 동력은 최적의 상태에서 1.2kW이다.

Table 2는 스택, 보조기 정미마력, 시스템효율을 포함하는 Nexa 시스템의 사양을 나타내었다(Ballard, 1998).

연료전지 하이브리드에서 에너지를 저장하기 위해서 니켈금속 수소화물(Nickel Metal Hydride, NiMH) 이차전지가 사용되었다. Cobasys Series 9500 EV Battery의 10모듈이며 120V, 10.2kWhr의 용량을 가진 팩이다.

확장 실험은 충전상태와 온도의 함수로서 용량, 개회로 전압, 내부저항을 평가하기 위해서 이차전지 모듈로 수행된다. 축전지 특성과 운전 매개변수의 의존도는 크기(sizing) 연구에서 적당한 축소 모형로 하는데 가장 중요하며, 제어된 하이브리드 시스템에서 예상하는 순간 SOC(state of charge)로 이용하기 위한 것이다.

이 실험에 사용된 잠재적인 자동차 형태는 근본적으로 연료전지 APU로 충전유지 전기자동차를 목표로 삼고 있고, ECMS(Equivalent Consumption Minimization Strategy)와 같이 연료소비를 최적화하는 것이다. 슈퍼바이저 알고리즘은 자동온도조절장치나 비례제어에 근거한다. 이러한 단순 알고리즘은 조정 가능한 여러 개의 변수를 가지고 있으며, 이것은 연료 절약, 성능, SOC(State of charge : 초기충전상태) 조정을 최적화를 하기 위해 변화된다.

이 수정된 비례항에서, FC동력 시스템을 효과적으로 사용하기 위해서 고효율 영역에서만 운전할 수 있도록 시스템으로부터의 저 동력 출력을 제한한다. 실제 수행에 있어서 최고 SOC 경우에 히스테리시스가 있다. 즉 이차전지가 최고 SOC 수위로 한번 충전되면 FC동력 시스템은 SOC가 어떤

Table 2 Specification of Nexa™ 1.2kW PEMFC Power System(Ballard, 1998)

Rated Power	1.2kW	System mass	13kg
Voltage	22~50V	Operating time	1500HRS
Water product	0.87 ℓ /hr	Cycle life	500회
Hydrogen consumption	<18.5 SLPM	Auxiliary power	35~250w

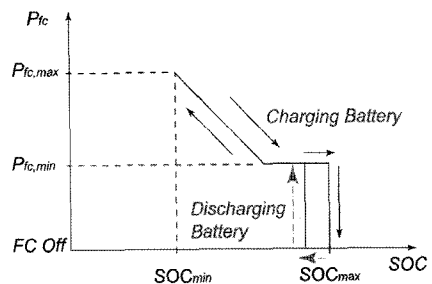


Fig. 2 Modified Proportional Control Algorithm

값 이하로 떨어질 때까지 이차전지에 동력을 제공하지 않는다. 이것은 FC동력시스템의 순환적인 스위칭을(cyclic switching)을 피하기 위한 것이다.

3. 시뮬레이션 결과

Table 3은 이차전지와 FC동력시스템 매개변수를 포함하는 시뮬레이션 설비 목록이다. 모든 구성은 초기조건(SOC₀)의 영향을 없애고 장시간(여러 개의 사이클)에 걸쳐 확인하기 위해서 10개의 연속적인 운전 사이클 동안 모의실험을 한 결과, SOC는 안정적이고 점진적인 값 주위에서 파동하였다. 이 연구에서 4시간의 운전시간을 나타내는 10개의 연속적인 FUDS를 사용했다.

Table 3 Vehicle Parameters and Driving Condition for a Typical case

Driving cycle	10 Consecutive FUDSs
Driving distance and time	119.89 km, 228 min
Peak speed	91.2 km/hr
Road condition	Smooth pavement with no grade and no wind
Vehicle model	GM Daewoo Matiz
Battery type	NiMH with 100% initial
Weight of battery pack	174 kg
Rated battery voltage and capacity	120V, 10.2 kWhr
Allowable range of SOC	15~100 %
Number of DC/DC converter	1, Step up
FC power system	Two 1kW PEMFC (0.45~2kW output)
Maximum EM power	45 kW
Proportional supervisory control gain	1

Fig. 3은 초기 FUDS 기간 중의 휠에서의 총 동력수요, 연료 동력, 이차전지 SOC를 보여준다. 이 그림은 초기 단계에서 이차전지에 의해 운전되어 SOC가 조금씩 하강하는 모습을 나타내고 있으며, 연료전지는 자체 운전에 필요한 양을 제외한

출력을 내지 않고 있다. Fig. 4는 10연속 FUDS 사이클 기간의 이차전지의 SOC의 장기간 방출을 보여주고 있다. 13699초 동안 운행되기까지도 SOC가 15% 미만으로 내려가지 않았음을 보여주고 있다.

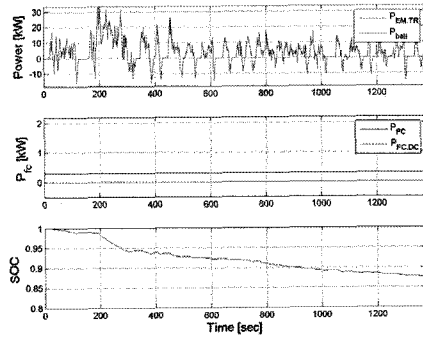


Fig. 3 Demanded battery and Fuel Cell Power with SOC during the first FUDS

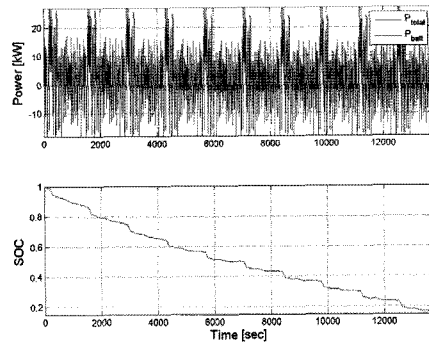


Fig. 4 Demanded battery and Fuel Cell Power with SOC during the Entire Simulation (10 FUDS)

Table 4에 나타난 바와 같이, FUDS의 처음 사이클 중단에서의 이차전지의 SOC는 처음 SOC의 100%로부터 시작하여 85%을 약간 상회하는 값까지 하강한다. 그리고, 다음의 사이클 동안에 SOC는 점진적으로 하강함을 알 수 있다. 전체 10개의 연속적인 FUDS 동안에, 최저 SOC는 16.7%이고, 반면에 최대 SOC는 100% 이다. 이는 최저 SOC의 경우에도 약 4.3kW의 구동력을 가지고 있음을 나타내며 에너지 저장 시스템의 용량이 적당하다는 것을 나타낸다. 마찬가지로, 연료전지시스템에서의 동력수요의 영역은 연료전지시

스택의 내구성을 보장하는 정격 2kW 최대 동력보다 현저하게 낮다.

Table 4 Simulation Outputs

Tractive power (kW)	Max		Avg	Std. Dev
	26.8		2.55	6.58
Total energy generated by the fuel cell	20117.4 kJ			
FC power (kw)	Max	Min	Avg	Std. Dev.
	2	0.5	1.47	0.69
Maximum battery discharging power	33.20 kW			
Maximum battery charging power	-17.72 kW			
Total energy stored in the battery	-21741.2 kJ			
Total energy drawn from the battery	53422.5 kJ			
Final SOCs(after each cycle of FUDS)[%]				
1st	2nd	3rd	4th	5th
87.67	75.85	65.45	56.95	50.06
6th	7th	8th	9th	10th
43.55	37.02	30.44	23.80	17.04
SOC (%)	Least	Max.	Avg.	
	16.7	100	51.3	
V _{batt} (V)	Max.	Min.	Avg.	
	148.7	120	133.5	
Maximum discharging current	251.5 A			

Table 5는 자동차의 시뮬레이션 결과와 연료전지 시스템 통계치를 요약한 것이다. 223분 운전시간에 약 120 km 거리를 주행하고 추정 수소 소모량은 407.6g 이다. 용량이 350bar에서 630g인 DyneCell L026과 같은 고압력 자동차 수소탱크를 가진 NEV는 FUDS 주행모드로 5시간 45분 동안 동안 185km 달릴 수 있다. Table 5는 평균 연료전지 효율과 주어진 하이브리드 시스템(이차전지, DC/DC 컨버터)의 효과적인 TTW(Tank-to wheel) 효율을 나타낸다. 평균 연료전지시스템 효율(43.7%)은 이 시스템의 최고치에 가깝고, TTW(Tank-to wheel) 평균효율은 SOC 차이를

고려하고도 45.6 %이다. 이것은 52.077 km/liter로 우수하고 오염이 없으면서도 도심지역이나 거주지, 산업현장이나 교육현장에서 사용하는 자동차로서 아주 높은 연비를 나타내고 있다.

Table 5 Simulation Outputs of the Vehicle and PEMFC Power System Efficiency

Total energy transferred to wheel	34928.6 kJ
Total energy generated by the PEMFC system	20117.4 kJ
Hydrogen consumption at 1.3 atm, 55°C	407.6 g
Equivalent energy of hydrogen consumption	46064.1 kJ
Equivalent amount of gasoline of hydrogen consumption	0.3654 gallon Gas
Equivalent amount of gasoline of battery charge difference	-0.24275 gallon Gas
Average fuel cell efficiency	43.7 %
Tank to wheel efficiency without battery charge difference	75.8 %
Tank to wheel efficiency with battery charge difference	45.6 %
Gasoline equivalent fuel economy(MPG)	52.077 km/l
Well to wheel efficiency (Hydrogen from Natural Gas Steam Reforming)	29.6 %

NEV(마티즈)는 두 개의 공기냉각 FC 동력시스템과 NiMH 이차전지로 하이브리드화 되었다. 이러한 시제품 FCNEV의 개발과 이 자동차의 운전을 관찰함으로써 설계 개념을 확인 할 수 있다.

4. 실 험

자동차의 설계된 하이브리드 FC 전동기구 구성을 확인하기 위해서 Fig. 5와 같이 축척된 시스템에서 실험하였다. 여기에서 자동차 전기부하는 자동차의 구동력 내력을 복제하기 위해서 프로그램을 할 수 있는 전자 부하로 대체되었다. 개인용 컴퓨터

터는 에너지 분석의 결과에 따르는 부하로 동력명령을 보낸다. 시험대에서 이차전지의 수와 FC동력시스템은 1/2로 축척되고 요구되는 부하도 1/2로 축척되었다.

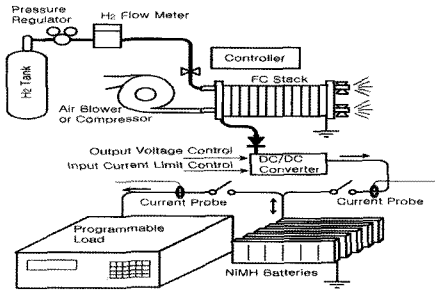


Fig. 5 Scaled FC Hybrid Test Bench

이 실험은 NEV를 이용해 초소형 자동차를 검증하기 위해 실행된 것이며 주행모드는 NYCC를 이용하였다. 마티즈 FCNEV의 1/2 크기를 나타내는 FC 하이브리드 시험대에서 2 개의 NYCC를 작동시켰다. Fig. 6^[6]에 나타난 바와 같이, 초기의 SOC는 80%를 조금 상회했다. SOC가 높기 때문에 FC동력시스템은 DC/DC 컨버터를 통해서 이차전지 측에 동력을 공급하지 못한다. 그러나 하이브리드 동력기구는 전기부하에 구동력을 제공한다. 즉, SOC가 75%까지 떨어질 때까지 자동차는 EV 모드로만 SOC가 75% 이하로 떨어진 뒤에 P_{FC} 는 $P_{FC,min}$ 이 되고, 이것은 450W로 조정된다. SOC는 65% 이하로 결코 떨어지지 않으므로 FC 동력은 Fig. 2에 나타난 수평된 비례 조정 알고리즘을 따르는 최소 값이 되도록 유지한다.

전기 부하는 버스 측으로부터의 동력을 끌어낼 때, FC 동력 시스템은 450W를 제공하고 수요의 나머지는 이차전지 펌에 의해 충족된다. 이것으로 설치된 슈퍼바이저 제어기의 작동을 확인할 수 있다. Fig. 6에서 보는 바와 같이, 이차전지의 SOC는 작동이 활발한 영역에서 도약한다. 두 개의 NYCC에 대한 최종 SOC로부터의 인식은 거의 같고, 수행된 하이브리드 FC 동력 시스템은 충전유지형이고 이것은 자동차의 설계목표이라는 결론을 내릴 수 있다.

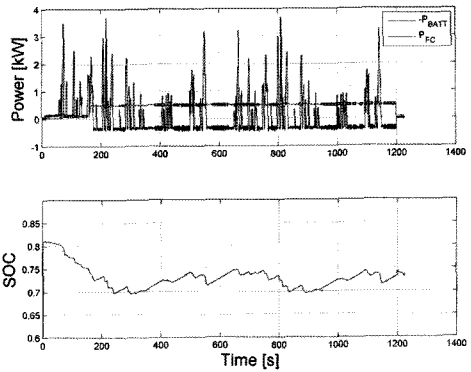


Fig. 6 Result of a half size NEV hybrid test on a test bench - Power and SOC

Fig. 7^[6]에 나타난 바와 같이, 서브컴포넌트의 동력은 이행된 슈퍼바이저 제어기가 어떻게 작동하는지를 잘 나타내고 있다. 만일 전류센서가 적당히 축척되지 않았다면 이러한 현상이 일어날 수도 있다. 그러나 이 경우에서의 인식된 모든 자료는 제안된 FCHEV의 모든 구성을 증명해 준다.

Fig. 8^[6]는 이 표본실험중의 Nexa 동력 시스템의 작동을 나타내고 있다. 슈퍼바이저 컨트롤러가 FC 동력 시스템으로부터 동력을 끌어낼 때까지, 순 FC 동력은 0으로 조정한다. 즉 FC 동력시스템은 정지모드에 있다. 정지하고 있는 동안에, FC

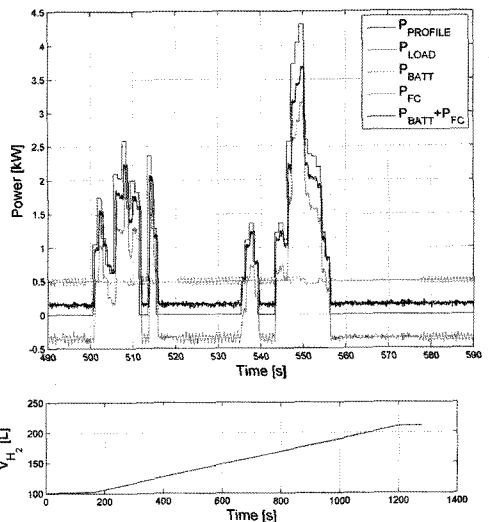


Fig. 7 Result of a half size NEV hybrid test on a test bench - Power of sub-components

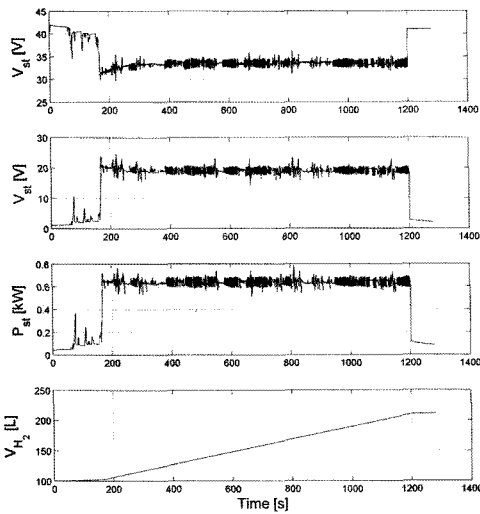


Fig. 8 Result of a half size NEV hybrid test on a test bench - Nexa power system

동력시스템은 FC 시스템이 살아있도록 하기 위해서 동력을 발생시키고, 이 동력은 운전모드에 비해 매우 적다. FC 스택의 저하 없이 FC 동력시스템을 완전히 운전/정지하지 못하기 때문에 동력발생의 양은 모두 손실이 되고, 전체 시스템 효율을 감소시킨다.

5. 결 론

측정된 FC 하이브리드 시험대와 시뮬레이션 결과를 혼합하여 도시근교의 운송을 위한 경부하 FC 하이브리드 전기자동차를 설계하기 위한 모든 방법을 확인할 수 있을 뿐 아니라 설치한 슈퍼바이저 조절기의 결합도 제거할 수 있다.

경부하 FC 하이브리드 전기자동차는 다음과 같은 특성을 가졌다.

1) 이 자동차의 평균 연료전지시스템 효율은 43.7%로 이 시스템의 최고치에 가깝고, TTW (Tank-to wheel) 평균효율은 SOC 차이를 고려하고도 45.6 %이다.

2) 연비는 52.077 km/l로 우수하며 오염이 없으면서도 도심환경이나 거주지, 산업현장이나 교육현장에서 이용할 수 있는 자동차로서 아주 높은 연비를 나타내고 있다.

통근용과 단거리 여행용인 FCHNEV을 시뮬레이션과 측정실험에 의해 연구를 수행한 결과, 한대 혹은 두 대의 공기냉각형 PEMFC 동력시스템과 NiMH 팩을 가진 하이브리드형 NEV를 제안한다. 이 규모의 자동차는 석유계 연료의 사용을 직접 감소시킬 뿐만 아니라, 도심 중심지역의 해로운 온실가스를 감소시켜 환경적인 측면에서도 좋은 평가를 받을 것이다.

참고문헌

- [1] C. J. Campbell and J. H. Laherrere, "The End of Cheap Oil", Scientific American, pp. 78~83, 1998.
- [2] IEA, World Energy Outlook 2004, Paris, France, 1998.
- [3] <http://www.kosta.or.kr/collect/>
- [4] 차재호, 에너지총설(하), 한국에너지정보센터, 2003.
- [5] Y. Guezennec, T. Choi, J. Marusiak, B. Yurkovich and W. Choi, "Sizing Study and Validation of a Hybridized Fuel Cell NEV with Bi-directional Grid Inter-connect for Sustainable Local Transportation", Proc. of IMECE2006 (2006-15338), Chicago, IL, Nov. 2006.
- [6] T. Choi, J. Marusiak, Y. Guezennec, G. Rizzoni, W. Choi and C. Panzeri, "Design and Validation of Light-Duty Hybrid Vehicle For Urban Transportation", Submitted to IFAC AAC Workshop 2007, Monterey Coast., 2007.

저 자 소 개



봉태근(奉 泰 根)

1956년 3월생, 1978년 목포해양대학교 기관과 졸업, 1989년 조선대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사), 1997년 조선대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사), 1990년~현재 목포해양대학교 기관시스템공학부 교수