

## 연료전지 하이브리드 자동차의 동력전달계의 용량 선정

정 춘 화<sup>1)</sup> · 신 창 우<sup>2)</sup> · 박 영 일<sup>3)</sup> · 차 석 원<sup>\*2)</sup>

서울대학교 기계항공공학부/정밀기계설계공동연구소<sup>1)</sup> · 서울대학교 기계항공공학부<sup>2)</sup> ·  
서울과학기술대학교 기계설계자동화 공학부<sup>3)</sup>

### Sizing of Powertrain in Fuel Cell Hybrid Vehicles

Chunhua Zheng<sup>1)</sup> · Chang Woo Shin<sup>2)</sup> · Yeong-il Park<sup>3)</sup> · Suk Won Cha<sup>\*2)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Mechanical and Aerospace Engineering/SNU-IAMD, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

<sup>2)</sup>Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

<sup>3)</sup>School of Mechanical Design and Automation Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

(Received 30 March 2011 / Accepted 28 April 2011)

**Abstract** : Fuel Cell Hybrid Vehicle (FCHV) is one of the most promising candidates for the next generation of transportation. It has many outstanding advantages such as higher energy efficiency and much lower emissions than internal combustion engine vehicles. It also has the ability of recovering braking energy. In order to design an FCHV drive train, we need to determine the size of the electric motor, the Fuel Cell System (FCS), and the battery. In this paper, the methodology for the sizing of these components is introduced based on the driveability constraints of the FCHV. A power management strategy is also presented because the battery energy capacity depends on it. The warm-up time of the FCS is also considered in the power management strategy and the simulation result is compared to that without considering the warm-up time.

**Key words** : Fuel cell hybrid vehicle(연료전지 하이브리드 자동차), Motor sizing(모터 사이징), FCS sizing(연료 전지 시스템 사이징), Battery sizing(배터리 사이징), Power management strategy(동력 관리 전략), Warm-up time(워밍업 타임)

### 1. 서 론

연료전지 하이브리드 자동차는 기존의 엔진 차량에 비해 에너지 효율이 높고 배기가스가 매우 적다는 장점을 가지고 있다.<sup>1)</sup> 또한 모터로 구동하기 때문에 회생제동이 가능하다. 효율적인 연료전지 하이브리드 자동차의 동력전달계를 디자인하기 위해서는 차량의 가속성능, 최고속도, 등판성능 등 요구에 의해 모터의 용량, 연료전지 시스템의 용량 및 배터리 용량 등을 결정해 주어야 한다. 배터리의 경우에는 차량의 주행 과정에서 배터리가 공급한 에너지와 회수한 에너지가 주행전략에 연관되므로 그 용량이 주행전략에 의존하게 된다.

본 연구에서는 연료전지 하이브리드 자동차의 동력전달계 구성요소들의 용량 선정 방법을 연구하였다. 연료전지 하이브리드 자동차용 성능해석 시뮬레이션 프로그램을 개발하여 연료전지 시스템의 효율 곡선에 의한 주행 전략을 적용함으로써 배터리 에너지 용량을 선정하였다.

2. 모터의 동력

### 2. 모터의 동력

연료전지 하이브리드 자동차에서 모터는 연료전

\*Corresponding author, E-mail: swcha@snu.ac.kr

지 시스템과 배터리의 전기적 에너지를 구동부에 기계적 에너지로 전달하여 주는 역할을 한다. 즉 자동차 바퀴에는 모터만 연결되어 있어 시리즈 타입의 하이브리드 자동차의 구조와 유사하다. 모터 용량 선정은 차량의 가속성능, 최고속도, 등판성능 등 요구 사양을 고려해야 하는데 이 가운데서 차량의 가속성능이 가장 큰 파워를 요구하므로 모터의 사이즈는 통상 가속성능에 의해 결정된다. 가속성능은 보통 차량이 정지 상태에서부터 출발하여 일정한 속도까지 가속하는데 걸리는 시간으로 평가한다. 본 연구에서는 Table 1<sup>2)</sup>에서와 같은 차량을 대상으로 하여 용량 선정을 진행하였다.

Table 1 Vehicle parameters

Item	Symbol	Value
Vehicle total mass (kg)	$M$	1500
Final drive gear efficiency (%)	$\eta_g$	95
Tire radius (m)	$R$	0.29
Aerodynamic drag coefficient	$C_D$	0.37
Vehicle frontal area (m <sup>2</sup> )	$A_f$	2.59
Air density (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_a$	1.23
Rolling resistance coefficient	$f_r$	0.014
Mass factor	$\delta$	1.15

차량을 정지 상태에서 일정한 속도  $V_f$  까지 시간  $t$  내에 가속시키는데 필요한 동력은 다음과 같이 표현된다.<sup>3)</sup>

$$P = \frac{\delta M}{2t} (V_f^2 + V_b^2) + \frac{2}{3} M g f_r V_f + \frac{1}{5} \rho_a C_D A_f V_f^3 \quad (1)$$

여기서  $V_b$  는 모터의 Base 속도에 대응되는 차량의 속도이다. 모터의 최고 속도가 5000rpm, Speed ratio가 4이고 차량의 최종감속비가 4, 종감속 기어의 효율이 95%,  $V_f$  가 100km/h라고 하였을 때 가속 시간  $t$ 와 가속에 필요한 모터 동력의 관계는 Fig. 1과 같다. 그림에서 보면 12s에 해당되는 모터 동력은 대략 75kW이다. 즉 Table 1의 차량이 정지 상태에서부터 100km/h까지 12s내에 가속하는데 필요한 모터 동력은 75kW이다. 본 연구에서는 이 시간을 기준으로 하여 모터 동력 75kW를 선정하였다.

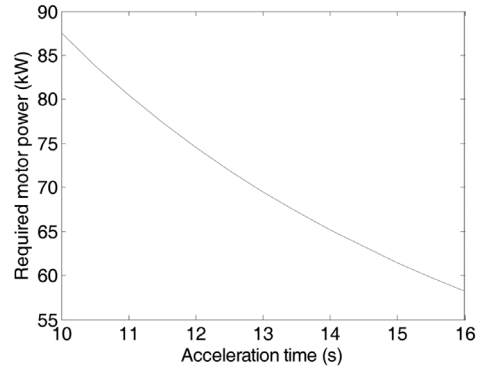


Fig. 1 Required motor power and acceleration time

### 3. 연료전지 시스템과 배터리의 동력

연료전지 하이브리드 자동차에서 연료전지 시스템은 주동력원으로서 보조동력원인 배터리의 도움이 없이도 평지와 등판 길에서 고속 등속 주행에 필요한 파워를 공급할 수 있어야 한다. 즉 최고 속도와 등판 성능 요구를 만족시켜야 한다. 차량이 일정한 속도  $V$ 로 주행할 때 필요한 동력은 다음과 같다.

$$P = M g f_r V \cos \alpha + \frac{1}{2} \rho_a C_D A_f V^3 + M g V \sin \alpha \quad (2)$$

여기서  $\alpha$ 는 도로의 경사도를 나타낸다. Fig. 2와 Fig. 3은 각각 평지와 경사도가 5%인 도로에서 차량이 등속으로 주행할 때 차량의 속도와 연료전지 시스템이 단독으로 공급해야 할 동력의 관계를 보여주고 있다. 여기서 종감속 기어의 효율은 95%, 모터의 평균 효율은 85%라고 가정하였다. 그림에서 보면 연료전지 시스템의 동력이 45kW일 때 평지에서는 약 130km/h, 5% 경사로에서는 약 95km/h로 등속 주행이 가능하다. 본 연구에서는 이 수치들을 기준으로 하여 연료전지 시스템의 최소 동력을 45kW로 선정하였다.

배터리 동력은 앞서 선정한 모터 동력과 연료전지 시스템의 동력 그리고 모터의 효율을 고려하여 구할 수 있다. Fig. 4는 모터 동력을 선정하였을 때 배터리 동력과 연료전지 시스템 동력의 관계를 보여준다. 위에서 선정한 모터 동력이 75kW이고 연료전지 시스템의 동력을 45kW로 하면 모터의 평균 효율이 85%일 때 배터리의 동력은 대략 43kW가 된다. 본 연구에서는 Table 2의 주행 성능을 만족시키도록 동력전달계를 Table 3과 같이 선정하였다.

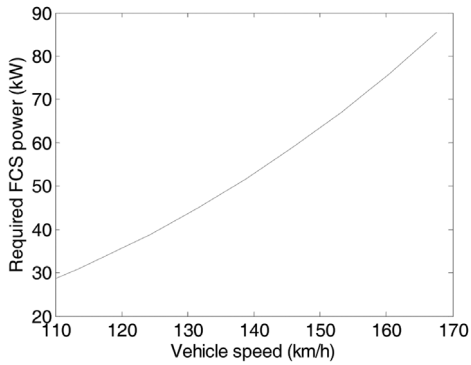


Fig. 2 Required FCS power and vehicle speed (flat road)

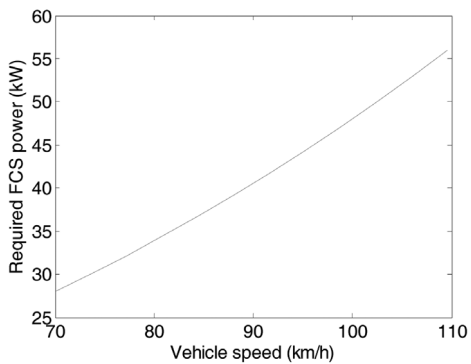


Fig. 3 Required FCS power and vehicle speed (grade road)

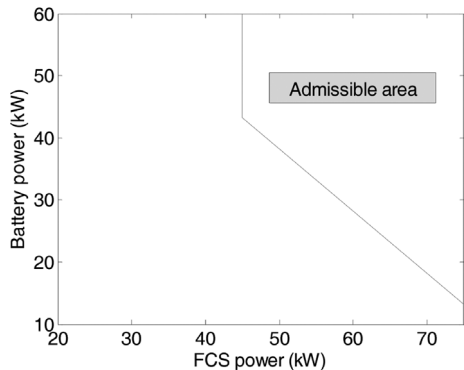


Fig. 4 Relationship between FCS power and battery power

#### 4. 연료전지 하이브리드 자동차의 주행전략과 배터리의 에너지 용량

앞 절에서 Table 3과 같이 동력전달계를 선정하였는데 여기서 배터리는 동력 용량과 별도로 에너지 용량을 고려하여야 하며 이는 연료전지 하이브리드 자동차의 주행전략에 따라 좌우된다. 본 연구에서

Table 2 Driveability constraints

Acceleration time from 0 to 100km/h (s)	12
Maximum speed (flat road) (km/h)	130
Maximum speed (grade road) (km/h)	95

Table 3 Powertrain parameters

Motor power (kW)	75
FCS power (kW)	45
Battery power (kW)	43

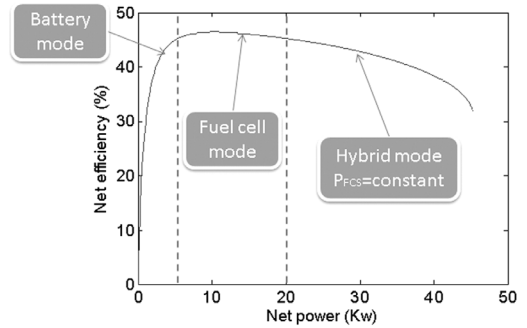


Fig. 5 Power management strategy of the FCHV

는 Fig. 5와 같이 연료전지 시스템의 효율특성에 근거한 룰 베이스 전략을 적용하였다. 이 전략은 연료전지 시스템이 효율이 높은 구간에서 작동하도록 하는 전략이다. 연료전지 시스템의 효율이 낮은 5kW 이하 파워 구간에서는 연료전지를 쓰지 않고 배터리만을 사용하며 5kW에서 20kW 사이에서는 연료전지 시스템의 효율이 높으므로 연료전지만을 사용한다. 요구 동력이 더 높아지면 하이브리드 모드가 적용되는데 이 때 연료전지 시스템은 일정한 동력을 공급하고 배터리가 나머지 동력을 공급하게 된다.

Fig. 6은 본 연구에서 개발된 연료전지 하이브리드 자동차용 시뮬레이션 프로그램이다. 그림에서 볼 수 있듯이 이 프로그램은 연료전지 시스템, 배터리, 모터, 운전자, 차량, 제어기 등 모듈별로 구축되어 있는데 제어기에 Fig. 5와 같은 전략이 적용되어 있다. 제어기와 각 모듈들은 신호적으로 연결되어 있고 각 모듈들 사이는 물리적 혹은 신호적으로 연결되어 있다.

Fig. 5의 전략을 Table 1의 차량에 적용하여 FTP75 urban 주행사이클에서 시뮬레이션을 수행하면 Fig. 7

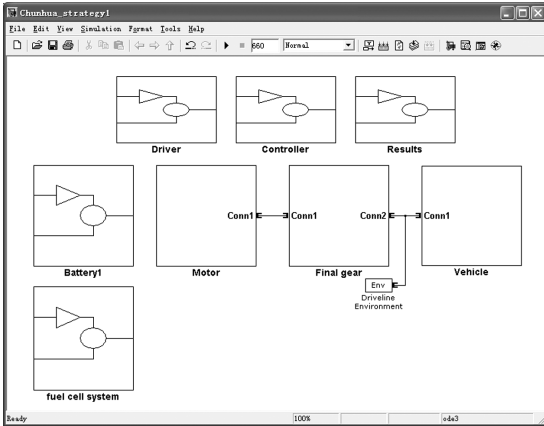


Fig. 6 Developed FCHV simulation program

과 같은 결과를 얻게 된다. 여기서 DC-DC 컨버터의 효율은 모두 95%로 하였고 회생제동은 앞 바퀴 축에서만 진행된다. 또한 상대적으로 느린 공기 압축기의 다이내믹을 고려한 연료전지 시스템의 Power-rate는 20kW/s로 가정하였다.<sup>2)</sup> 주행 중 배터리 에너지 변화량은 다음과 같이 결정된다.<sup>4)</sup>

$$E_{change} = \int_{traction} P_{OUT} dt - \int_{braking} P_{IN} dt \quad (3)$$

여기에 배터리 SOC의 사용 가능 범위를 고려하면 다음과 같이 필요한 배터리 에너지 용량을 구할 수 있다.

$$E_b = \frac{E_{change}}{K} \quad (4)$$

여기서  $K$ 는 배터리 SOC의 사용 가능범위이다. Fig. 7의 결과를 보면 배터리의 에너지 변화량은 대략 0.125kWh인데 배터리 SOC의 사용 가능 범위가 0.4에서 0.8까지 즉 사용 가능 범위를 40%라고 가정하면 필요한 배터리 에너지 용량은 0.3125kWh이다.

앞에서도 언급했듯이 연료전지 시스템은 동적거동이 느리다. 또한 작동 초기 시스템의 온도를 작동 온도까지 높여주는 시간 즉 워밍업 시간이 필요하다. 이 시간 동안 만약 차량이 정지상태로 대기하고 있으면 차량이 출발한 후에 Fig. 5와 같은 제어전략이 적용되지만 만약 대기하지 않고 그대로 출발하였다면 이 시간 동안 실제로 연료전지 시스템은 동력을 공급할 수 없으며 배터리가 단독으로 동력을 공급하게 된다. 따라서 차량이 대기하지 않고 바로 출발하였을 경우에는 Fig. 8와 같이 워밍업 시간 동안에는 배터리가 동력을 공급하고 이 시간이 지나면 Fig. 5의 룰 베이스 전략이 적용된다.

Fig. 8의 전략을 Table 1의 차량에 적용하여 FTP75 urban 주행사이클에서 시뮬레이션을 수행하면 Fig. 9와 같다. 여기서 워밍업 시간은 10분으로 하였다.<sup>1)</sup> 그림에서 보면 배터리 에너지의 변화량은 대략

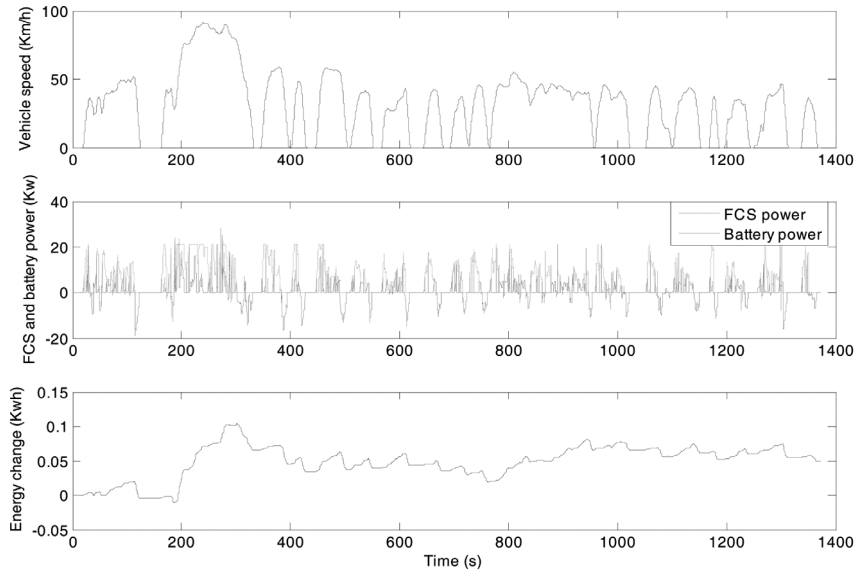


Fig. 7 Simulation results of the FCHV

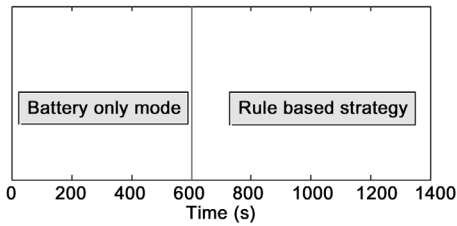


Fig. 8 Power management strategy considering warm-up time

1.17kWh인데 배터리 SOC의 사용 가능 범위가 앞서서와 같이 40%라고 하면 필요한 배터리 에너지 용량은 2.925kWh가 된다. 정리하면 FTP75 urban 주행 사이클에서 워밍업 시간을 고려하지 않은 경우와 고려한 경우에 배터리에 필요한 에너지 용량은 Table 4에서와 같다. 비교해 보면 워밍업 시간을 고려할 때 훨씬 더 큰 배터리 에너지 용량이 필요하며 이는 워밍업 시간을 고려하지 않은 경우에 필요한 배터리 에너지 용량의 약 9.4배에 해당된다.

시뮬레이션에 적용된 제동 알고리즘은 다음과 같다. 먼저 앞 뒤 바퀴축의 제동력을 비례적으로 분배한 다음 앞바퀴축에서 다시 회생제동량과 기계적 제동량을 분배하는데 이때 회생제동을 우선적으로 하고 나머지를 기계적 제동으로 보충한다. 시뮬레이션을 수행해 보면 FTP75 urban 주행 사이클에서 이런 알고리즘으로 대략 74.97%의 회생제동이 가능하다.

Table 4 Battery energy capacity

Not considering warm-up time	0.3125kWh
Considering warm-up time	2.925kWh

### 5. 결론

본 연구에서는 연료전지 하이브리드 자동차의 동력전달계의 설계에 필요한 사이징 작업을 수행하였다. 모터의 동력, 연료전지 시스템의 동력 그리고 배터리 동력은 차량의 주행 성능 사양인 가속성능, 최고속도, 등판성능 등 요구들을 고려하여 선정하였다. 배터리의 에너지 용량은 차량의 주행전략과 밀접한 관계가 있다. 본 연구에서는 연료전지 시스템의 효율 특성을 고려한 룰 베이스 전략을 적용하였으며 회생제동량이 대략 74.97%인 앞 뒤 바퀴축의 제동력을 비례적으로 분배하는 제동 알고리즘을 적용하였다. 또한 연료전지 시스템의 워밍업 시간을 고려하지 않은 경우와 고려한 경우를 나누어 각각 필요한 배터리 에너지 용량을 선정하였다. 결과 FTP75 urban 주행 사이클에서 워밍업 시간을 고려한 경우는 고려하지 않은 경우의 9.4배에 가까운 배터리 에너지 용량이 필요하였다.

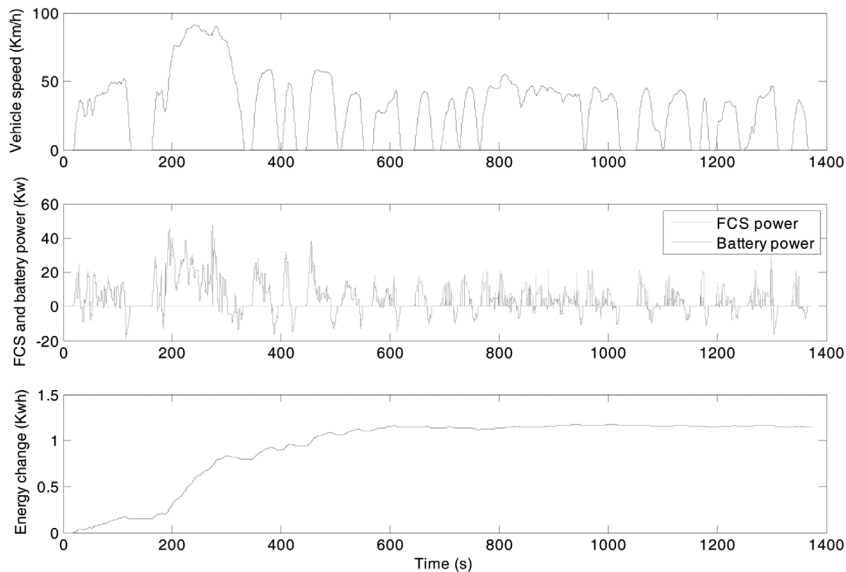


Fig. 9 Simulation results of the FCHV (including warm-up)

## 후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2011-0001276)과 지식경제부 산업원천기술개발사업(10033110, HEV/PHEV 시스템 성능 최적화 및 통합제어 원천기술개발)의 일환으로 수행되었습니다.

## References

- 1) M. Ehsani, Y. Gao and A. Emadi, Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles, 2nd Edn., CRC Press, Boca Raton, pp.459-469, 2010.
- 2) J. Bernard, S. Delprat, F. N. Büchi and T. M. Guerra, "Fuel-cell Hybrid Powertrain: Toward Minimization of Hydrogen Consumption," IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.58, pp.3168-3176, 2009.
- 3) M. Ehsani, Y. Gao and A. Emadi, Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles, 2nd Edn., CRC Press, Boca Raton, pp.105-120, 2010.
- 4) Y. Gao and M. Ehsani, "Systematic Design of Fuel Cell Powered Hybrid Vehicle Drive Train," SAE 2001-01-2532, 2001.