

연료전지 하이브리드 자동차의 ECMS

정 춘 화¹⁾ · 박 영 일²⁾ · 임 원 식³⁾ · 차 석 원^{*1)}

서울대학교 기계항공공학부/정밀기계설계공동연구소¹⁾ · 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과²⁾ ·
서울과학기술대학교 기계자동차공학과³⁾

Equivalent Consumption Minimization Strategy of Fuel Cell Hybrid Vehicles

Chunhua Zheng¹⁾ · Yeong-il Park²⁾ · Wonsik Lim³⁾ · Suk Won Cha^{*1)}

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

²⁾Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

³⁾Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

(Received 5 September 2011 / Revised 2 June 2012 / Accepted 9 June 2012)

Abstract : Fuel Cell Hybrid Vehicles (FCHVs) have become a major topic of interest in the automotive industry owing to recent energy supply and environmental problems. Several types of power management strategies have been developed to improve the fuel economy of FCHVs including optimal control strategy based on optimal control theory, rule-based strategy, and equivalent consumption minimization strategy (ECMS). The ECMS is applied in this study. This strategy is based on the heuristic concept that the usage of the electric energy can be exchanged to equivalent fuel consumption. This strategy is known as one of the promising solutions for real-time control of hybrid vehicles. The ECMS for an FCHV is introduced in this paper as well as the equivalent fuel consumption parameter. The relationship between the battery final state of charge (SOC) and the fuel consumption while changing the equivalent fuel consumption parameter is obtained for three different driving cycles. The function of the equivalent fuel consumption parameter is also discussed.

Key words : Fuel cell hybrid vehicle(연료전지 하이브리드 자동차), Power management strategy(동력관리 전략), Equivalent consumption minimization strategy(등가 소모량 최소화 전략), Equivalent fuel consumption parameter(등가 연료 소모량 파라미터)

1. 서론

연료전지 하이브리드 자동차가 자동차 업계에서 차세대 자동차로 주목을 받으면서 이에 관한 여러 가지 주행 전략들이 제기되고 있다. 그중 등가 소모량 최소화 전략(ECMS)은 배터리의 전기적 에너지 소모를 연료전지 시스템의 연료 소모로 등가 처리하여 전체적인 에너지 소모를 최소화하는 전략으로

서 실차 적용에도 가능한 전략으로 관심을 받고 있다. 본 논문에서는 연료전지 하이브리드 자동차에 대한 ECMS를 소개하였다. 또한 연료전지 시스템의 연료 소모량과 배터리의 전기적 에너지 소모량 사이의 등가 연료 소모량 파라미터가 최적해의 선정에 미치는 영향에 대하여 분석하였으며 세 가지 주행사이클에서 이 파라미터를 변화시키면서 배터리 SOC의 최종 값과 연료 소모량사이의 관계를 얻었다. 이런 분석들을 통하여 실차 적용에서 등가 연료

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

소모량 파라미터를 제어함으로써 배터리 SOC의 경로를 제어할 수 있다는 결론을 얻었다.

2. 차량과 동력전달계

본 연구에 사용된 차량의 파라미터들은 Table 1에서와 같다. 이 데이터들은 Reference 1을 참조하였다. 시뮬레이션에 사용된 차량 동력전달계에 관한 정보는 Table 2에 제시되어 있다. 45 kW의 연료전지 시스템과 1.5 kWh의 배터리를 동력원으로 사용하였으며 모터는 75 kW짜리를 사용하였다. 본 연구에서 DC-DC 컨버터의 효율은 95%로 하였으며 연료전지 시스템의 느린 응답성으로 인한 power rate는 18 kW/s로 하였다.

Table 1 Parameters of the vehicle

Item	Value
Vehicle total mass (kg)	1500
Final drive gear efficiency (%)	95
Tire radius (m)	0.29
Aerodynamic drag coefficient	0.37
Vehicle frontal area (m ²)	2.59
Air density (kg/m ³)	1.21
Rolling resistance coefficient	0.014

Table 2 Powertrain parameters

Motor	75 kW
Fuel cell system (FCS) net power	45 kW
FCS power rate	18 kW/s
Battery energy capacity	1.5 kWh

연료전지 시스템 모델은 Reference 2를 참조하였으며 이 모델에 사용된 관련 데이터들은 Table 3에서와 같다.

Fig. 1은 본 연구에 사용된 연료전지 시스템의 네

Table 3 Parameters used in the FCS model

Item	Value
Anode pressure (atm)	2
Cathode pressure (atm)	1.97
Stack temperature (°C)	80
Cell number	242
Active area (cm ² /cell)	280
Membrane thickness (cm)	0.01275

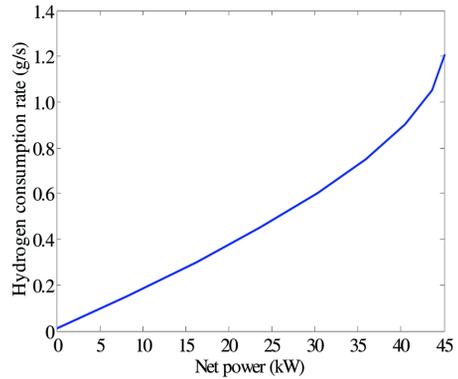


Fig. 1 FCS net power and fuel consumption rate

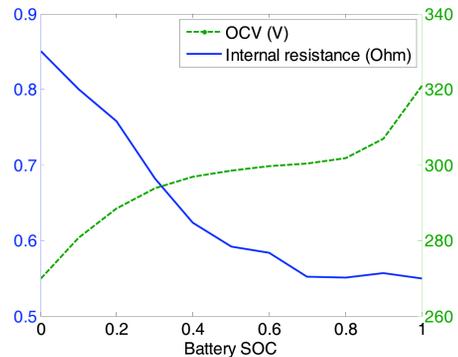


Fig. 2 Battery SOC and internal resistance, and battery SOC and OCV

트 파워와 연료소모율의 관계를 보여주고 있다.

배터리는 내부저항 모델^{3,4)}을 사용하였다. 이 모델에서 배터리 각 파라미터들 사이의 관계는 다음 수식으로 표현된다.

$$\dot{SOC} = -\frac{I}{Q_{bat}} \quad (1)$$

$$I = \frac{V(SOC) - \sqrt{V(SOC)^2 - 4R(SOC) \cdot P_{bat}}}{2R(SOC)}$$

여기서 Q_{bat} 은 배터리 용량을 나타내고 P_{bat} 은 배터리 파워를 나타내며 I 는 배터리의 전류를 나타낸다.

Fig. 2는 본 연구에 사용된 배터리의 성능 곡선을 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 배터리의 내부저항 R 와 open circuit voltage (OCV) V 는 배터리 SOC에 따라 변하고 있다. 본 연구에서 사용된 배터리 모델에서는 온도의 영향을 일단 무시하였다.

3. 등가 소모량 최소화 전략(ECMS)

ECMS는 하이브리드 자동차에서 배터리의 전기적 에너지 소모량을 연료 소모량으로 등가화 시킬 수 있다는 컨셉을 기반으로 하고 있다. 이 컨셉을 적용하여 전체 등가 연료 소모량을 최소화시키는 해를 찾아냄으로써 동력 분배를 수행한다. 이 부분에서는 연료전지 하이브리드 차량에 대한 ECMS의 적용에 대하여 알아본다.

ECMS에서 등가 연료 소모율은 다음 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C = C_{fcs} + k \cdot C_{bat} \quad (2)$$

여기서 C_{fcs} 은 Fig. 1의 연료전지 시스템의 연료 소모율을 나타내고 C_{bat} 은 배터리의 등가 연료 소모율을 나타낸다. 그리고 k 는 등가 연료 소모량 파라미터인데 그 작용에 대해서는 뒤 부분에서 설명한다.

배터리가 공급한 양만큼의 파워가 연료전지 시스템에서 공급되었다고 가정하면 그때 Fig. 1의 관계에 의해 연료전지 시스템의 연료 소모율을 구할 수 있다. 이 연료 소모율이 바로 배터리의 등가 연료 소모율이 된다. 따라서 C_{bat} 은 다음의 수식으로 표현될 수 있다.

$$C_{bat} = \frac{C_{fc,avg}}{P_{fcs,avg}} \cdot (P_{bat} + I^2 R) \quad (3)$$

여기서 $C_{fc,avg}$ 은 연료전지 시스템의 평균 연료 소모율을 나타내고 $P_{fcs,avg}$ 은 연료전지 시스템의 평균 네트 파워를 나타낸다. 주행사이클이 주어졌을 때 구동 모터에 필요한 파워를 알 수 있으므로 식 (3)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$C_{bat} = \frac{C_{fc,avg}}{P_{fcs,avg}} \cdot (P_{req} - P_{fcs} + I^2 \cdot R) \quad (4)$$

여기서 P_{req} 은 구동 모터에 필요한 파워이고 P_{fcs} 은 연료전지 시스템의 네트 파워이다.

식 (4)에서 $C_{fc,avg}$ 와 $P_{fcs,avg}$ 가 주어진 연료전지 시스템에 대해 상수이고 P_{req} 도 위에서 언급했듯이 상수이다. I 는 식 (1)에서 알 수 있듯이 배터리 SOC와 P_{bat} 의 함수인데 여기서도 역시 SOC와 P_{fcs} 의 함수로 생각할 수 있다. R 은 Fig. 2에서 볼 수 있듯이

SOC의 함수이다. 따라서 식 (4)에서 C_{bat} 은 P_{fcs} 와 배터리 SOC의 함수로 표현될 수 있다. 또한 Fig. 1에서 알 수 있듯이 C_{fcs} 은 P_{fcs} 의 함수이다. 그러므로 식 (2)는 다음과 같이 표현된다.

$$C = C_{fcs}(P_{fcs}) + k \cdot C_{bat}(P_{fcs}, SOC) \quad (5)$$

시뮬레이션 실행 시 매 타임 스텝마다 주어진 배터리 SOC에 대하여 등가 연료 소모율 C 를 최소화시키는 P_{fcs} 를 찾아내면 전반 주행사이클에 대해 등가 연료 소모량을 최소화할 수 있는 최적의 경로를 구할 수 있다.

Fig. 3과 Fig. 4는 배터리 SOC가 0.7, 구동 모터에 필요한 파워가 20 kW인 순간 등가 연료 소모량 파라미터 k 가 각각 0.6과 0.7인 경우에 대하여 식 (5)에서 언급한 등가 연료소모율 C 를 최소화시키는 연료전지 시스템의 파워 P_{fcs} 가 결정되는 것을 보여주고 있다. 이 두 그림의 결과들은 각각의 시뮬레이션 타임 스텝에서의 전반 연료전지 시스템 파워 P_{fcs} 의 범위에 대한 연료전지 시스템의 연료 소모율 C_{fcs} , 배터리의 등가 연료 소모율 C_{bat} , 그리고 전체 차량의 등가 연료 소모율 C 를 나타낸다. 두 그림에서의 C 의 형상으로부터 C 의 값을 최소화시키는 P_{fcs} 를 찾을 수 있다는 것을 알 수 있다. 그림에서 확인해 보면 이 두 경우에서 선택된 P_{fcs} 는 모두 20 kW미만으로 구동 모터에 필요한 파워보다 작은데 이는 이 두 경우 모두 하이브리드 모드로 작동한다는 것을 보여준다. 만약 선택된 P_{fcs} 가 20 kW이상이라면 이는 배터리 충전모드로 작동된다는 것을 설명해 준다.

위의 두 그림을 비교해 보면 다음과 같은 것을 알 수 있다. 등가 연료 소모량 파라미터 k 가 커지면 등가 연료 소모율 C 를 최소화시키는 P_{fcs} 도 커진다. 이는 k 를 증가함으로써 배터리의 에너지 소모를 줄일 수 있고 따라서 배터리 SOC의 경로를 변화시킬 수 있다는 것을 의미한다. ECMS에서 등가 연료 소모량 파라미터 k 는 바로 이러한 작용을 하며 연료전지 시스템의 연료소모와 배터리의 전기적 에너지의 소모사이의 척도를 나타내고 있다. 따라서 시뮬레이션 과정에서 k 를 제어함으로써 배터리 SOC의 경로를 제어할 수 있게 된다.

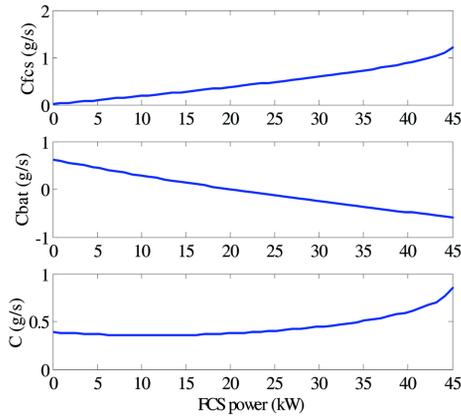


Fig. 3 Determination of FCS power ($k=0.6$)

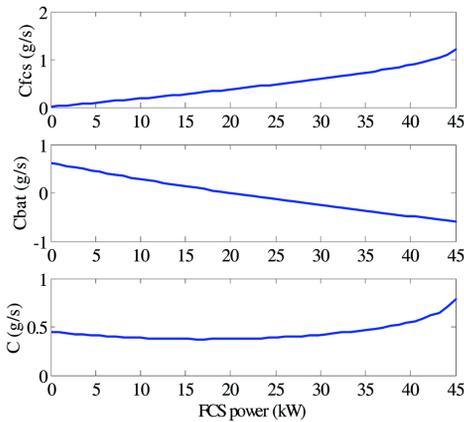


Fig. 4 Determination of FCS power ($k=0.7$)

실제로 기존의 연구⁵⁾에서는 배터리 SOC를 일정한 값으로 유지시켜 주기 위해 k 를 상수 대신에 다음과 같이 정의하였다.

$$k = 1 - 2\mu \cdot \frac{(SOC - 0.5(SOC_H + SOC_L))}{SOC_H - SOC_L} \quad (6)$$

여기서 SOC_H 와 SOC_L 는 각각 배터리 SOC의 허용 최대치와 최소치를 나타내고 μ 는 배터리 SOC의 밸런스 계수이다. 식 (6)에서 배터리 SOC와 k 의 관계를 μ 값 별로 나타내면 Fig. 5와 같다. 여기서 SOC_H 은 0.8로 하고 SOC_L 은 0.4로 하였다. 그림에서 보면 배터리 SOC값이 작아지면 k 값은 커진다. 위에서 언급했듯이 k 값이 커지면 배터리의 에너지 소모를 줄이므로 배터리 SOC가 떨어지는 것을 막을 수 있다. μ 값이 커질수록 직선의 경사도가 더 커지는데 이는

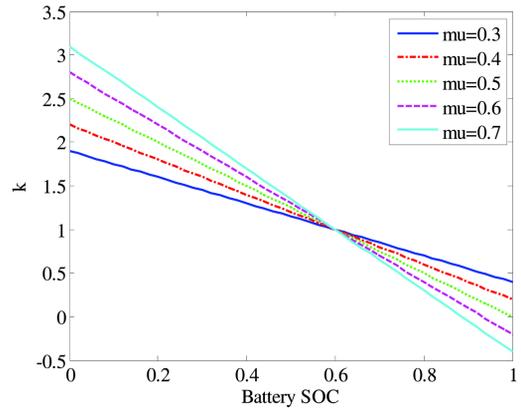


Fig. 5 Relationship between battery SOC and k

배터리 SOC가 떨어지는 것을 더 신속히 막을 수 있다는 것을 설명한다. 반대로 배터리 SOC값이 커지는 경우에도 마찬가지로 해석될 수 있다.

4. ECMS의 시뮬레이션 결과

본 연구의 시뮬레이션에서는 ECMS의 등가 연료 소모량 파라미터 k 를 상수로 적용하였다. k 값을 변화시키면서 배터리 SOC의 최종 값과 연료 소모량을 각 주행사이클 별로 체크하여 도시하면 Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8에서와 같다. 이 세 주행사이클은 각각 FTP75 urban, NEDC 2000, Japan 1015 주행사이클이다. 세 그림에서 보면 배터리 SOC의 최종 값과 연료 소모량은 근사한 비례적인 관계를 가진다. 세 그림에서 final SOC가 커질수록 대응되는 k 의 값이 커지는데 이는 앞서서도 언급했듯이 k 값이 클수록 배터

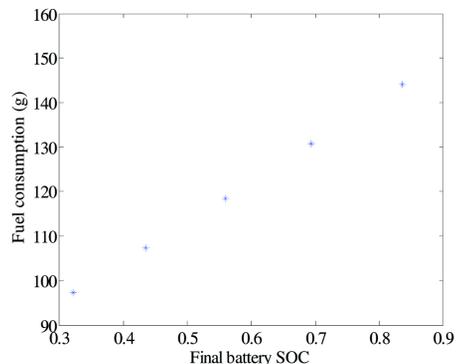


Fig. 6 Relationship between battery final SOC and fuel consumption for the FTP75 urban driving cycle

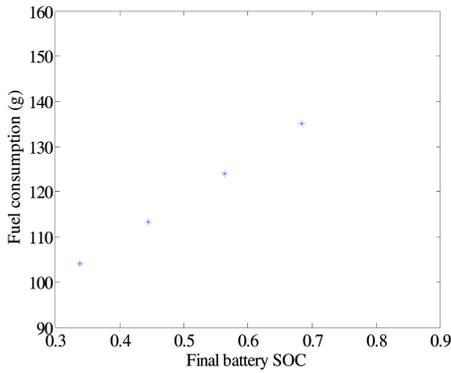


Fig. 7 Relationship between battery final SOC and fuel consumption for the NEDC 2000 driving cycle

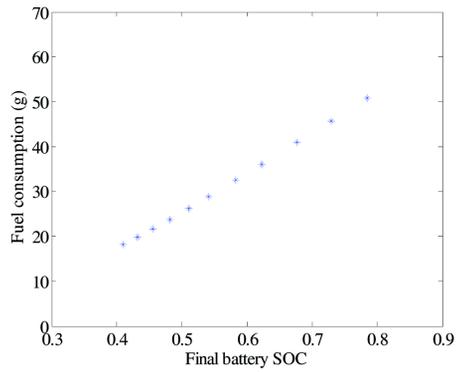


Fig. 8 Relationship between battery final SOC and fuel consumption for the Japan 1015 driving cycle

리의 에너지 소모를 줄이게 되므로 대응되는 배터리 SOC 최종 값이 커지게 된다.

ECMS는 실차 적용에도 가능한 전략으로 주목받고 있는데 실차 적용에서의 포인트는 바로 주행 중 증가 연료 소모량 파라미터 k 를 적당하게 선정해주는 것인데 이때 위에서 언급한 k 와 배터리 SOC의 관계를 적용할 수 있다.

Fig. 9는 FTP75 urban 주행사이클에서의 시뮬레이션 결과인데 각각 차량속도, 연료전지 시스템과 배터리의 파워, 연료 소모량 그리고 배터리 SOC의 경로를 보여주고 있다.

이 시뮬레이션에서도 k 는 상수 값을 취하는데 이 값은 배터리 SOC의 초기 값과 최종 값이 일치하도록 선정하였다. FCS의 파워경로는 매 순간마다 식

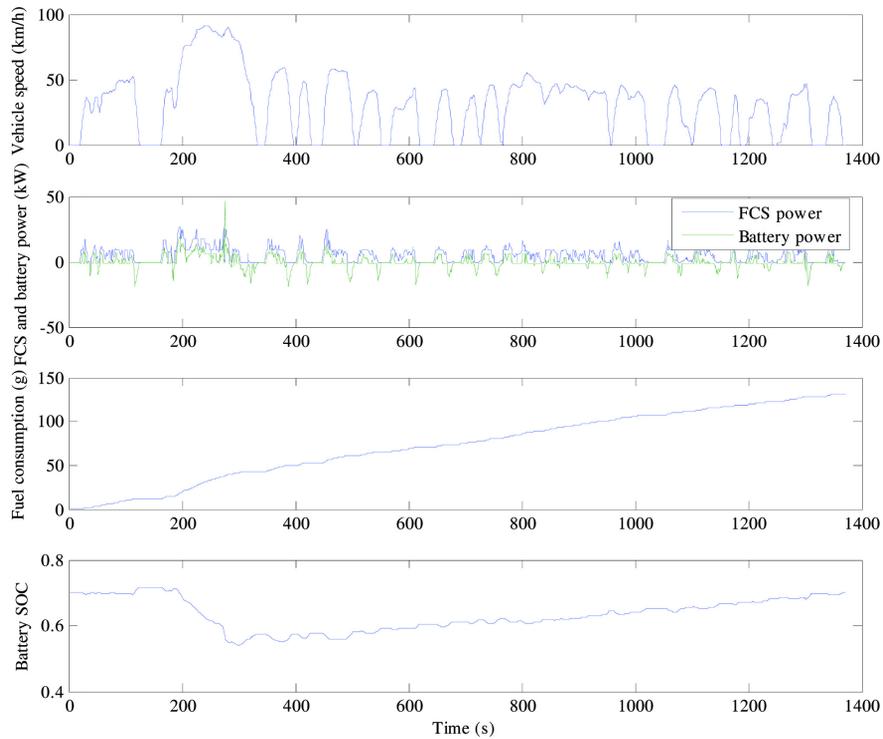


Fig. 9 Simulation results of the ECMS on the FTP75 urban driving cycle ($k=0.6404$)

(5)의 등가 연료 소모율 C 를 최소화시키는 값을 찾아내는 것으로 결정된다. 이로써 배터리 파워경로와 배터리 SOC경로도 결정되고 따라서 동력분배가 수행된다.

본 연구에서는 배터리 온도의 영향을 고려하지 않았는데 연료전지 하이브리드 차량의 연비를 고려함에 있어 배터리 온도도 중요한 요소이다. 배터리 온도를 고려한다면 배터리의 OCV와 내부저항이 온도의 영향을 받으므로 3 파트에서 소개되었던 ECMS의 formulation을 새롭게 해야 할 것이고 또한 새로운 전략에 따라 연료소모가 달라질 것으로 예상된다.

5. 결 론

본 논문에서는 ECMS를 연료전지 하이브리드 자동차에 적용하였다. ECMS는 배터리의 전기적 에너지 소모를 연료전지 시스템의 연료 소모로 증가화하여 전체 등가 연료 소모량을 최소화하는 주행전략이다. 이 주행전략에서 등가 연료 소모량 파라미터 k 는 연료전지 시스템의 연료 소모와 배터리의 에너지 소모사이의 등가 파라미터로서 두 동력원 사이의 에너지 소모를 조절해 주는 작용을 한다. k 가 클수록 배터리의 에너지 소모는 줄어들고 배터리 SOC는 증가하며 따라서 연료전지 시스템의 연료 소모는 늘어난다. 이 관계를 ECMS의 실차 적용에 사용하면 주행 중 k 를 제어함으로써 배터리 SOC의 경로를 제어할 수 있게 된다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2012-0000921)과 지식경제부 산업원천기술개발사업(10033110, HEV/PHEV 시스템 성능 최적화 및 통합제어 원천기술개발)의 일환으로 수행되었습니다.

References

- 1) J. Bernard, S. Delprat, F. N. Büchi and T. Marie Guerra, "Fuel-cell Hybrid Powertrain: Toward Minimization of Hydrogen Consumption," IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.58, pp.3168-3176, 2009.
- 2) J. T. Pukrushpan, H. Peng and A. G. Stefanopoulou, "Control-oriented Modeling and Analysis for Automotive Fuel Cell Systems," Transactions of the ASME, Vol.126, pp.14-25, 2004.
- 3) N. W. Kim, Energy Management Strategy for Hybrid Electric Vehicles Based on Pontryagin's Minimum Principle, Ph. D. Dissertation, Seoul National University, Seoul, 2009.
- 4) N. W. Kim, S. W. Cha and H. Peng, "Optimal Control of Hybrid Electric Vehicles Based on Pontryagin's Minimum Principle," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.19, pp.1279-1287, 2011.
- 5) L. Xu, J. Li, J. Hua, X. Li and M. Ouyang, "Optimal Vehicle Control Strategy of a Fuel Cell/Battery Hybrid City Bus," Int. J. Hydrogen Energy, Vol.34, pp.7323-7333, 2009.