

# 연료전지 하이브리드 자동차에 대한 퍼지논리 기반 에너지 운용전략

論 文

54D-12-4

## Fuzzy Logic-Based Energy Management Strategy for FCHEVs

安 鉉 植<sup>†</sup> · 李 南 洙<sup>\*</sup>

(Hyun-Sik Ahn · Nam-Su Lee · Gu-Min Jeong)

**Abstract** - The work in this paper presents development of fuzzy logic-based energy management strategy for a fuel cell hybrid electric vehicle. In order for the fuel cell system to overcome the inherent limitation such as slow response time and low fuel economy especially at the low power region, the battery system has come to compensate for the fuel cell system. This type of hybrid configuration has many advantages, however, the energy management strategy between power sources is essentially required. For the optimal power distribution between the fuel cell system and the battery system, a fuzzy logic-based energy management strategy is proposed. In order to show the validity and the robustness of suggested strategy, some simulations are performed for the standard drive cycles.

**Key Words** : Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles, Energy Management Strategy, Fuzzy Logic Control, SOC

### 1. 서 론

최근 수송 분야에서 화석연료의 고갈문제, 환경공해문제 그리고 지구 온난화 문제 등을 해결하기 위하여 저공해 및 무공해 자동차에 대한 연구와 개발이 활발히 이루어지고 있다. 특히, 연료전지를 전력원으로 사용하는 연료전지 자동차(Fuel Cell Electric Vehicle : FCEV)는 손쉽게 구할 수 있는 수소연료의 사용과 물 이외의 배출물이 없다는 면에서 많은 관심을 끌고 있다. 또한 연료전지와 배터리를 조합한 하이브리드 방식을 이용함으로써 두 전력원의 특성을 효과적으로 활용할 수 있게 되었는데, 이러한 형태를 연료전지 하이브리드 자동차(Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle : FCHEV)라고 한다.

하이브리드 자동차의 경우에는 저부하에서 고부하까지의 출력 요구에 대응하여 연료전지를 고효율의 영역에서 작동시킬 수 있으며, 차량의 감속 시 열에너지로 소비되었던 제동에너지를 회수할 수 있어 연비를 향상시킬 수 있다 [1]. 그러나 이러한 방식의 자동차는 주행상황에 따라 요구되는 전력을 두 종류의 전력원에 어떻게 나눠서 분담시켜야 할지를 결정하는 에너지 운용전략이 필요하게 된다.

또한 하이브리드형 자동차의 에너지 운용전략에 대한 연구는 '내연기관-배터리 하이브리드형'에 대하여 연구되기 시작하여 최근에는 '연료전지-배터리 하이브리드형'에 대한 확

장연구가 진행 중이다. 기본적인 에너지 운용전략으로는 정적 에너지 운용전략(Static Energy Management Strategy : SEMS)이 있으며, 목적함수 기반의 최적제어방식과 퍼지논리 기반의 제어방식을 이용한 에너지 운용전략이 제안되고 있다 [3-7].

본 논문에서는 연료전지 하이브리드 자동차에 대하여 하이브리드 전력원 서브시스템의 테이터만을 활용한 퍼지논리 기반 에너지 운용전략을 제안하고, 그 유용성을 기존의 방법과 비교하여 평가하고자 한다. 대표적인 표준 주행 사이클에 대한 시뮬레이션 결과를 통하여 제안된 에너지 운용전략의 성능을 기존의 정적 에너지 운용전략과 비교 검토한다. 또한 하이브리드 전력원 서브시스템의 모델링 불확실성이 존재하여도 기존의 방법에 비해 차량의 연비 특성이 우수하게 유지됨을 보인다.

### 2. 퍼지논리 기반 에너지 운용전략

연료전지 하이브리드 차량의 효율적인 에너지 운용을 위하여 가능한 한 다음과 같이 몇 가지 조건을 만족시키며 하이브리드 전력원을 동작시켜야 한다. 우선, 연료전지 시스템을 에너지 변환 효율이 우수한 구간에서만 동작시킨다. 또한, 배터리 시스템에 저장된 에너지의 사용은 충/방전 손실을 고려하여 가능한 한 그 사용을 지양한다. 이와 동시에 배터리의 과다한 충/방전으로 인한 수명저하를 방지하기 위해 배터리 SOC(State Of Charge)가 기준 범위 안에 유지되도록 해야 한다. 그러나 위에서 첫번째 조건에 따라 연료전지 시스템을 에너지 효율이 최대인 한 지점에서만 동작시킨다면 차량에 요구되는 에너지와 실제 공급된 에너지 간의 차이가 발생할 때마다 배터리 시스템의 빈번한 충/방전이 발생하게 된다. 따라서 차량의 연비를 증가시키기 위해서는

<sup>†</sup> 교신저자, 正 會 員 : 國民大學校 電子情報通信工學部 教授  
E-mail : ahs@kookmin.ac.kr

<sup>\*</sup> 學生會員 : 國民大學校 大學院 電子工學科 碩七課程  
接受日字 : 2005年 9月 12日  
最終完了 : 2005年 11月 1日

위의 두 가지 조건을 적절하게 상호절충 시키는 것이 필요하다.

기존의 정적 에너지 운용전략 SEMS는 배터리 전류와 SOC에 기준 값들을 두고, 이에 따라 연료전지의 출력이 몇 단계로 조절되는 방식을 취하고 있으나 고정된 기준 값들을 사용함으로써 연료전지나 배터리의 효율 특성 파라미터가 변할 경우 성능에 큰 영향을 미치는 문제점이 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 시스템의 수학적 모델링에 대한 의존도가 적고, 각 시스템에 대한 경험적 지식을 충분히 활용하여 전력분배를 효과적으로 제어할 수 있는 퍼지논리 기반 에너지 운용전략(Fuzzy logic-based Energy Management Strategy : FEMS)을 제안한다. 제안된 FEMS를 이용한 하이브리드 전력분배제어시스템의 구조를 나타내면 그림 1과 같다.

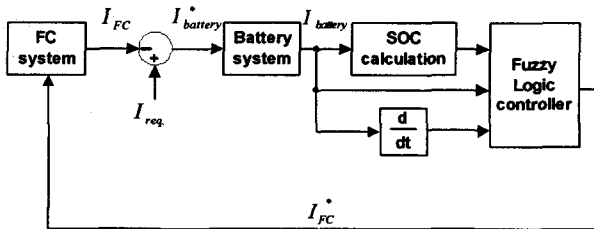


그림 1 FEMS를 이용한 하이브리드 전력분배제어시스템  
Fig. 1 Hybrid power distribution control system based on FEMS.

차량에서 요구되는 전류  $I_{req}$ 와 실제 연료전지 출력전류  $I_{FC}$ 와의 차이에 따라 배터리 측에 요구되는 전류  $I_{battery}^*$ 가 계산되고, 배터리 충/방전 효율을 고려하여 실제 배터리 전류  $I_{battery}$ 가 계산된다.  $I_{battery}$ , SOC 및  $d/dt(I_{battery})$ 를 퍼지논리 제어기의 입력으로 고려하였으며, 연료전지에 요구되는 전류  $I_{FC}^*$ 를 출력으로 하였다. 각 퍼지입력 및 출력에 대한 소속함수는 5개씩 사용했으며 비퍼지화는 무게중심법을 이용하였다. 제안된 에너지 운용전략에 사용된 퍼지논리 제어기의 규칙베이스를 설계하는 기본적인 개념은 다음과 같다.

- 1) 'SOC'가 작은 경우 출력( $I_{FC}^*$ )을 크게 하며, 큰 경우는 출력을 작게 한다.
- 2) ' $I_{battery}$ '와 ' $\frac{d}{dt}I_{battery}$ '가 작은 경우 출력의 크기도 작게, 큰 경우는 출력도 큰 경향이 되도록 한다.
- 3) 퍼지논리 제어기의 출력을 결정하는 입력에 대한 가중치는 다음의 순서를 따른다.

$$SOC > I_{battery} > \frac{d}{dt}I_{battery} \quad (1)$$

에너지 운용전략의 개발 및 성능평가를 위해 만든 FCHEV 시뮬레이션 모델을 그림 2에 나타내었는데, 각 서브시스템들의 수학적 모델링과 특성곡선 등을 Matlab/

Simulink 프로그램으로 구현하였다 [2]. 하이브리드 전력원은 배터리, 연료전지 및 DC/DC 컨버터 모델을 포함하고 있으며, 배터리는 연료전지보다 응답속도가 훨씬 빠르므로, 배터리로부터의 전력공급시 지연시간은 없다고 가정하였다.

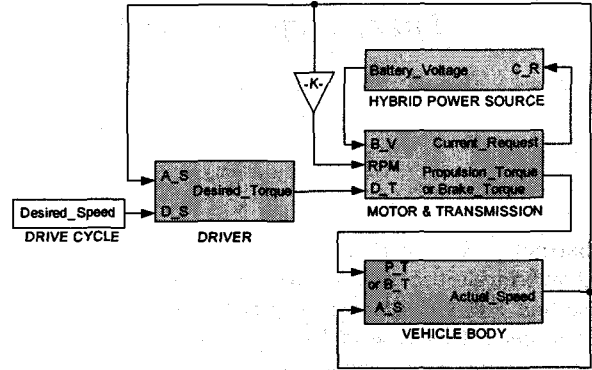


그림 2 FCHEV 시뮬레이션 모델의 기본구조  
Fig. 2 Basic structure of FCHEV Simulation model.

### 3. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안한 FEMS를 사용하여, 표준 주행 사이클에서 시뮬레이션을 통하여 그 성능을 검증하였다. 사용된 표준 주행 사이클은 UDDS(Urban Dynamometer Driving Schedule)와 HWFET(HighWay Fuel Economy Test)가 사용되었다. 시뮬레이션에 사용된 차량 파라미터는 중형의 연료전지/배터리 하이브리드 승용차를 가정하며, 관련 파라미터들은 [5]에서와 동일하다. 배터리 효율식은 충전 및 방전시에 대하여 각각 다음과 같이 가정한다 [3].

$$\eta_{charge} = 0.95 \quad (2)$$

$$\eta_{discharge} = 0.8 - 0.1SOC^2 \quad (3)$$

또한 에너지 운용전략의 성능에 큰 영향을 미치는 배터리 효율의 변화시 발생하는 연비 변화를 파악하기 위하여 배터리 효율식을 다음과 같이 수정하고 시뮬레이션을 수행한다.

$$\eta_{charge} = 0.85 \quad (4)$$

$$\eta_{discharge} = 0.7 - 0.1SOC^2 \quad (5)$$

그림 3에 SEMS와 FEMS를 사용하였을 때의 최종 연료소모량과 배터리 SOC를 나타내었다. 두 가지 운용전략 모두 최종 배터리 SOC가 초기 설정치인 60% 정도를 잘 유지했음을 확인할 수 있다. 그러나 FEMS를 사용하였을 때 연료 사용량이 더 감소되었으며, 특히 고속 주행 패턴이 많은 HWFET 주행 사이클에서 그 차이가 크게 나타났다. 배터리 효율 저하 후의 시뮬레이션 결과에서도 역시 SEMS를 사용하였을 때 수소연료가 더 많이 소모되었으므로 FEMS가 특성 파라미터의 변동에 대하여 강인함을 확인할 수 있다.

그림 4와 5는 UDDS 주행 사이클에서 배터리 SOC 및 연료소모량 파형으로, 배터리 SOC 변화를 통하여 FEMS가

SEMS 보다 좀 더 적절히 전력을 분배함으로써 배터리의 충/방전을 효과적으로 억제하고 있음을 알 수 있다.

### 4. 결 론

본 논문에서는 연료전지 하이브리드 자동차의 연비를 개선하기 위해 퍼지논리 기반 에너지 운용전략을 제안하였다. 제안된 에너지 운용전략의 성능평가를 위하여 Matlab/Simulink 프로그램을 이용한 시뮬레이션 환경을 구축하였으며, 표준 주행 사이클을 이용한 시뮬레이션을 통하여 정적 에너지 운용 전략과 비교 검토하였다. 두 가지 운용전략 모두 적절한 전력분배를 통하여 배터리 SOC를 오차범위 이내로 유지시켰으나, 제안된 에너지 운용전략이 기존의 방법보다 배터리 충/방전 현상을 줄임으로써 연비를 향상시켰음을 확인 하였다. 또한 배터리 효율 변화 후의 시뮬레이션 결과에서도 제안된 방법의 강인성을 확인하였다.

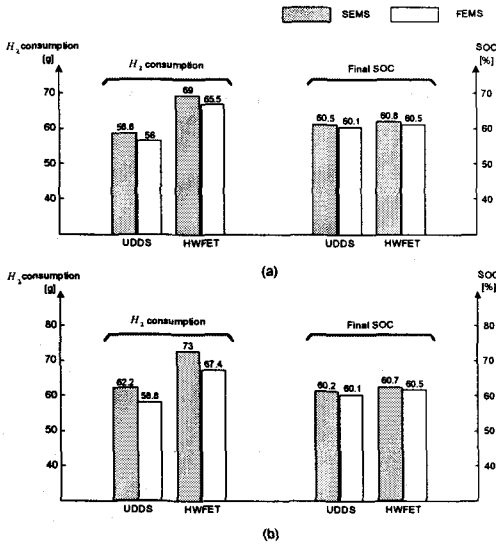


그림 3 EMS에 따른 연료소모량 및 최종 SOC  
 (a) 배터리 효율이 정확한 경우, (b) 불분명한 경우  
**Fig. 3** Fuel consumption and final SOC following the EMS  
 (a) when battery efficiency is exactly known  
 (b) when battery efficiency is inexactly known.

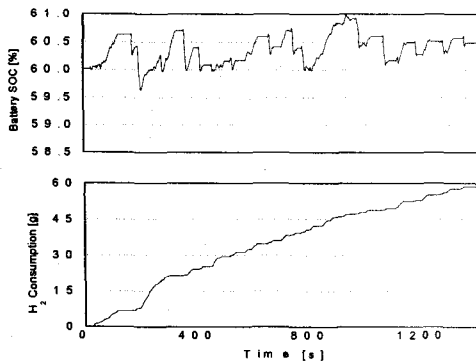


그림 4 정적 에너지 운용전략의 시뮬레이션 결과  
**Fig. 4** Simulation results of SEMS.

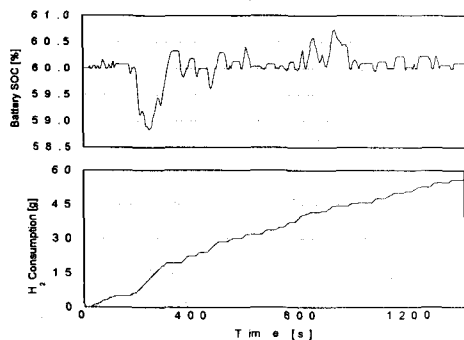


그림 5 퍼지논리 기반 에너지 운용전략의 시뮬레이션 결과  
**Fig. 5** Simulation results of FEMS.

### 감사의 글

본 연구는 2004년도 국민대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

- [1] Tadaichi Matsumoto, Nobuo Watanabe, Hiroshi Sugiura and Tetsuhiro Ishikawa, "Development of fuel-cell hybrid vehicle," *SAE 2002-01-0096*, 2002.
- [2] K. H. Hauer and R. M. Moore, "Fuel cell vehicle simulation-Part 3: Modeling of individual components and integration into the overall vehicle model," *Fuel Cells*, No. 3, pp. 105-121, 2003.
- [3] D. H. Choi and H. S. Kim, "An operation algorithm for a 2shaft parallel type hybrid electric vehicle for optimal fuel economy," *Transactions on KSAE*, Vol. 2, No. 5, pp. 122-130, 2001.
- [4] Arun Rajagopalan, Gregory Washington, Giorgio Rizzoni, and Yann Guezennec, "Development of fuzzy logic and neural network control and advanced emissions modeling for parallel hybrid vehicles," The Ohio-State University, 2001.
- [5] N. S. Lee, S. Y. Shim, H. S. Ahn, J. Y. Choi, I. Choy, and D. H. Kim, "Modeling and an efficient combined control strategy for fuel cell electric vehicles," *Proc. of ICCAS*, Bangkok, 2004.
- [6] Lawrence Buie, Malcolm Fry, Peter Fussey and Chad Mitts, "An application of cost based power management control strategies to hybrid fuel cell vehicles," *SAE 2001-01-1299*, 2001.
- [7] Seo-Ho Choi, Soon-Won Kwon, Nam-Woo Lee, and Tae-Won Lim, "Design of fuzzy logic power distribution controller for fuel cell hybrid vehicles," *Proc. of FISITA*, Barcelona, 2004.