

# 연료전지 하이브리드 자동차에 대한 에너지 운용전략의 비교 연구

## Comparative Study on Power Control Strategies for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles

기영훈\*, 정구민\*\*, 안현식\*\*\*, 김도현\*\*\*

(Young-Hun Ki, Gu-Min Jeong, Hyun-Sik Ahn, and Do-Hyun Kim)

**Abstract** - In this paper, three types of power control strategies for controlling a Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle(FCHEV) are studied in view of fuel economy. The FCHEV has become one of alternatives for future vehicles since it does emit water only without any exhaust gas while it has a high well-to-wheel efficiency together with an energy saving due to regenerative braking. However, it has also several disadvantages such as the complexity of vehicle system, the increased weight and the extra battery cost. Among various power control strategies, a static power control strategy, a power assist control strategy and a fuzzy logic-based power control strategy are simulated and compared to show the effectiveness of each method.

**Key Words** :Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle, power control strategy, Fuzzy Logic Control, SOC

### 1. 서론

최근 엄격해진 국제 환경 규격에 의한 온실가스 배출량의 규제와 화석연료의 고갈문제에 대한 해결책으로 각국의 자동차 회사들은 배기가스 배출물을 근본적으로 저감시킬 수 있는 환경 친화적 자동차 개발을 가속화하고 있다. 그 첫 해결책으로써 전기자동차가 대두되었으나, 짧은 주행거리와 긴 충전시간의 문제로 한계를 드러내었으며, 내연 기관과 배터리를 이용한 하이브리드 자동차는 우수한 효율을 입증하였으나, 근본적으로 내연기관의 한계를 안고 있다는 점에서 최후안이 되지는 못할 전망이다. 한편, 연료전지 하이브리드 자동차(FCHEV)는 두 가지 동력원인 연료전지와 배터리를 효과적으로 결합시켜 연비 및 환경문제 등 사회적 요구사항을 만족하는 해결책으로 주목받고 있다.

FCHEV는 배터리를 보조 동력원으로 사용하는 것에 의한 추가적인 비용과 차량의 무게를 증가시키는 단점에도 불구하고 연료전지 스택을 효율이 좋은 영역에서 운전시킬 수 있으며, 제동시 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 운용 전략에 따라 연비성능의 차이가 생기게 된다. 따라서 에너지 운용 전략은 FCHEV의 구조 및 구동원의 용량비 등에 따라 적절히 선정 되어야 한다.

본 논문에서는 FCHEV에 대하여 기존의 대표적인 에너지 운용 전략인 정적 에너지 운용 전략, 파워 어시스트 에너지 운용 전략 및 퍼지논리 기반 에너지 운용 전략에 대해 살펴보고 표준 주행 사이클에 대한 시뮬레이션 결과를 통하여 각각의 에너지 운용 전략의 성능을 비교 검토한다.

### 2. FCHEV의 시스템 구성

FCHEV는 그림 1과 같은 하이브리드 방식의 자동차 구성을 갖는다. 수소 연료는 연료전지 시스템에 의해 전기적인 에너지로 변환된다. 연료전지에 의해 생산된 전기적인 에너지는 구동모터로 전달되거나 배터리로 흡수된다.

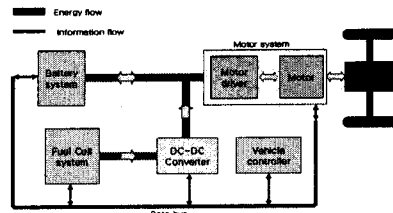


그림 1 FCHEV의 에너지 및 신호 흐름.

DC/DC 컨버터는 배터리 시스템과 연료전지 시스템의 연계와 전력변환을 위하여 사용된다. 연료전지에 의해 생산된 에너지는 컨버터를 통해 배터리에 충전되기도 하고 배터리와 함께 구동모터로 에너지를 전달한다. 전달되거나 배터리를 충전시키기 위한 경우 바퀴에 전달되는 모든 동력은 전기모터에 의해 공급되며, 전기모터에 공급되는 전력은 연료전지 시스템 및 배터리 시스템에 의해 공급된다.

### 저자 소개

- \* 國民大學校 電子工學科 碩士課程
- \*\* 國民大學校 電子工學科 助教授·工博, 交信著者
- \*\*\* 國民大學校 電子工學科 教授·工博

### 3. FCHEV 에너지 운용전략

연료전지 하이브리드 차량의 효율적인 에너지 운용을 위하여 연료전지를 에너지 변환 효율이 우수한 구간에서만 동작시킨다. 동시에 배터리의 과다한 충전/방전으로 인한 수명저하를 방지하기 위해 배터리 SOC (State Of Charge)가 기준 범위 안에 유지되도록 해야 한다. 차량의 연비를 증가시키기 위해서는 위의 두 가지 조건을 적절하게 상호절충시키는 것이 필요하다.

#### 3.1 정적 에너지 운용전략

정적 에너지 운용 제어기의 구조는 그림 2와 같다 [2]. 출력인 연료전지의 요구 전류량은 SOC 제어기와 전력분배 제어기의 합으로 구성된다. SOC 제어기는 배터리 SOC가 정해진 기준 범위보다 작을 경우 연료전지에 정해진 전류 값을 요구하게 되어, 배터리 SOC가 일정하게 유지되도록 해준다. 전력분배 제어기는 사용되는 배터리 전류 값에 따라 세단계로 연료전지의 출력을 조절한다. 연료전지 시스템의 출력이 자동차에서 요구하는 전력보다 작아서 배터리의 사용이 많아질 경우 이에 따라 연료전지의 출력을 늘려줌으로써, 과다한 배터리 방전을 억제한다. 또한 반대의 경우 연료전지의 출력을 줄여줌으로써 자동차에 발생하는 잉여 전력을 줄여줌으로써, 이로 인한 배터리 충전을 억제한다.

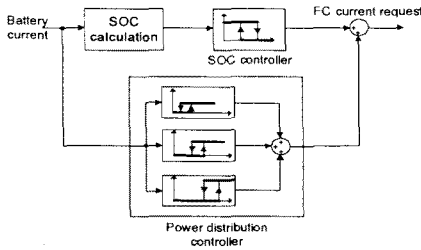


그림 2 정적 에너지 운용 제어기의 구조.

#### 3.2 파워 어시스트 에너지 운용전략

파워 어시스트 에너지 운용전략은 연료전지 스택이 주 동력원이고 배터리는 발전·가속시 연료전지 스택을 보조하는 운용전략이다. 등속 혹은 가벼운 가속으로 주행이 이루어진 경우 동력의 분배는 요구되는 동력의 크기에 따라 스택의 효율이 좋지 않은 저 파워 영역에서는 배터리에 의한 운전이 이루어지며 스택의 효율이 좋은 중간 파워 영역에서는 연료전지 스택에 의해서 차량이 구동되도록 하였다 [3].

차량이 고 파워를 요구하는 가속 모드에서의 배터리에 의한 어시스트 파워의 양은 SOC 유지 전략에 의하여 결정된다. 식(1)은 배터리 SOC에 따른 가중합수에 의한 배터리 어시스트 파워량을 나타낸 것이다.

$$P_{assist} = P_{max} \times WF_1(SOC). \quad (1)$$

$$T_{regen} = WF_2(V) \times WF_3(SOC) \times T_m. \quad (2)$$

차량의 감속시에는 회생제동 알고리즘을 적용하였으며 이때 회생제동 토크의 크기는 현재 차량의 속도와 배터리 SOC

에 따른 가중합수를 통하여 식(2)와 같이 계산된다. 또한 운전자의 제동감 저하를 방지하기 위해 요구 제동력보다 회생 제동력이 크게 작용하지 않는 알고리즘을 적용하였다 [4].

#### 3.3 퍼지논리기반 에너지 운용전략

이 방식의 경우에는 퍼지로지 제어기의 입출력 선정과 규칙베이스의 설계방식에 따라 그 성능이 결정된다 [5-7]. HEV의 경우 퍼지로지 제어기의 입력으로 운전자의 감/가속 신호, 구동모터와 차량의 속도 및 배터리 SOC 등이 선정되고, 출력으로는 모터와 엔진의 구동신호 등이 선정된다. FCHEV의 경우는 퍼지로지 제어기의 입력으로 운전자의 감/가속 신호, 배터리 SOC 및 전류, 차량 속도 등이 선정되고, 출력으로는 연료전지의 구동신호가 선정된다. 그림 3은 퍼지 로직을 이용한 전력분배 제어시스템의 구조를 나타낸다.

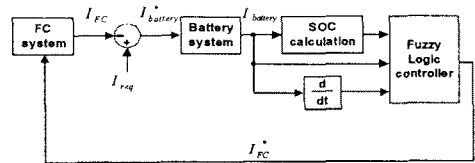


그림 3 퍼지논리를 이용한 전력분배 제어시스템.

차량에서 요구되는 전류  $I_{req}$ 와 실제 연료전지 출력전류  $I_{FC}$ 와의 차이에 따라 배터리 측에 요구되는 전류  $I_{battery}^*$ 가 계산되고, 배터리 충전/방전 효율을 고려하여 실제 배터리 전류  $I_{battery}$ 가 계산된다.  $I_{battery}$ , SOC 및  $d/dt(I_{battery})$ 가 퍼지논리 제어기의 입력이 되며, 연료전지에 요구되는 전류  $I_{FC}^*$ 가 출력으로 계산된다. 퍼지논리 제어기에 사용되는 소속 함수와 규칙베이스는 FCHEV 시스템의 특성에 맞춰 조정한다.

### 4. 시뮬레이션 결과

파워 어시스트 에너지 운용전략에서의 가중합수는 그림 4의 가중 함수를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. UDSS (Urban Dynamometer Driving Schedule)의 주행 사이클을 사용하였으며, 중형의 FCHEV 승용차의 파라미터 값을 시뮬레이션에 사용하였다 [2].

앞 절에서 제시한 세 가지 운전 전략에 대한 시뮬레이션 결과를 그림 5 ~ 그림 7에 나타내었다. 세 가지 운용전략 모두 초기의 배터리 SOC값인 60%를 잘 유지하였지만 수소 소비량에서는 차이를 볼 수 있었다. 정적 에너지 운용전략의 경우 연료전지에 의한 배터리 충전을 빈번하게 수행하여 연료전지의 사용이 많아져서 수소 소비량이 가장 많고, 퍼지논리기반 에너지 운용전략의 경우 배터리 SOC는 가장 작은 범위에서 동작을 하였으나 파워 어시스트 전략에 비해 상대적으로 수소의 소비가 많은 것을 알 수 있다. 파워 어시스트 에너지 운용전략의 경우 배터리 SOC가 큰 변화를 보이지만 최종 값은 초기의 60%를 회복 하였으며, 연료전지 스택의 효율이 좋은 구간에서만 동작을 시켜 가장 좋은 연비성능을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나 배터리의 충전전 특성 등이 시간에 따라 변하는 실제적인 경우에는 입출력 데이터에 따라 작용하는 퍼지논리기반형 전략이 효과적인 것으로 예상

된다.

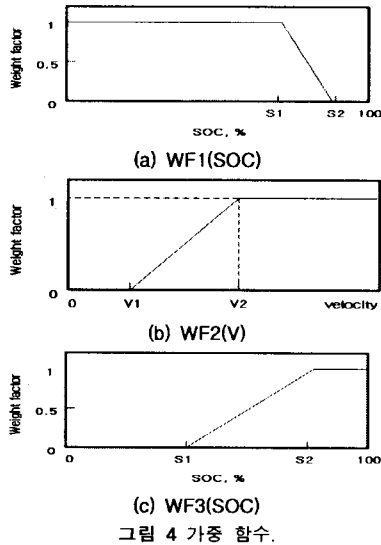


그림 4 가중 함수.

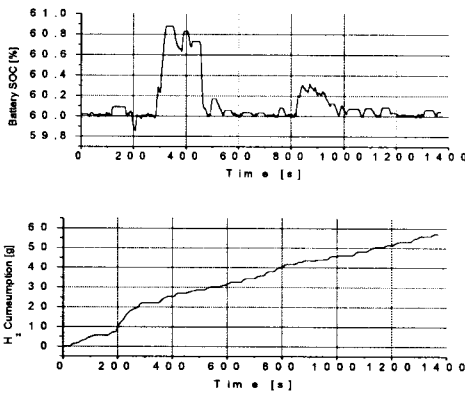


그림 5 정적 에너지 운용전략의 시뮬레이션 결과.

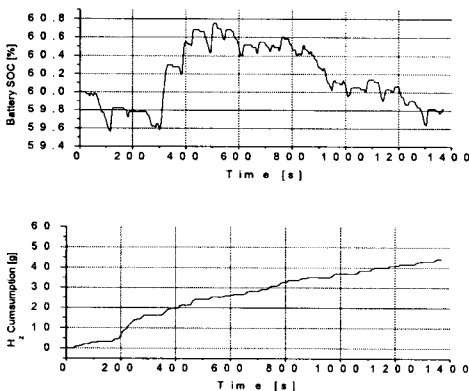


그림 6 파워 어시스트 에너지 운용전략의 시뮬레이션 결과.

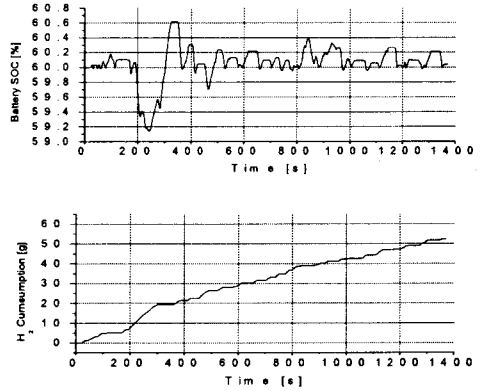


그림 7 퍼지논리기반 에너지 운용전략의 시뮬레이션 결과.

## 5. 결론

본 논문에서는 FCHEV의 연비 성능에 따른 에너지 운용 전략을 선정하기 위해서 위의 세 가지 전략에 대해 Matlab/Simulink 프로그램으로 시뮬레이션 환경을 구축하고, 표준 주행 사이클을 이용한 시뮬레이션을 통하여 비교 검토 하였다. 세 가지 운용전략 모두 배터리 SOC 값을 초기 값에 근접한 값으로 유지시켰으나, 파워 어시스트 에너지 운용전략이 수소 소비량이 가장 적어 효율적인 방법으로 판단된다.

## 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] 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.
- [3] 박창훈, 오경철, 오경철, 김현수, "연료전지 하이브리드 차량의 운전전략", 한국자동차공학회 추계학술대회논문집 pp.523-528, 2003.
- [4] H. Yeo and H. Kim, "Hardware-in-the-loop simulation of regenerative braking for a hybrid electric vehicle," Proc. Instn. Mech. Engrs., vol. 216, no. 11, pp. 855-864, 2002.
- [5] H. D. Lee and S. K. Sul, "Fuzzy-logic-based torque control strategy for parallel-type hybrid electric vehicle," IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 45, No. 4, pp. 625-632, 1998.
- [6] B. M. Baumann, G. Washington, B. C. Glenn, and G. Rizzoni, "Mechatronic design and control of hybrid electric vehicles," IEEE/ASME Trans. Mechatronics, Vol. 5, No. 1, pp. 58-72, 2000.
- [7] N. J. Schouten, M. A. Salman and N. A. Khir, "Fuzzy logic control for parallel hybrid vehicles." IEEE Trans. Control Systems Technology, Vol, 10, No. 3, pp. 400-468, 2002.