

자동차 구동용 연료전지시스템 설계

Design of Fuel Cells as Automotive Propulsion Systems

이 기 춘 / Ki-Chun Lee
현대자동차
Hyundai Motor Company



임 태 원 / Tae-Won Lim
현대자동차
Hyundai Motor Company

자동차용 연료전지

연료전지의 종류는 전해질의 종류로 나누는 것이 일반적이며, 운전 및 정지를 반복하는 자동차용에는 작동 온도까지 상변화가 없는 고체 전해질이 유리하다고 할 수 있는데 프로톤 교환막과 고체산화물이 바로 그것이다.

프로톤 교환막 연료전지는 다른 종류의 연료전지 보다 작동온도가 80℃ 내외로 낮고, 단위전지 면출력밀도가 커서 현재 자동차용으로 가장 많이 개발되고 있다. 그 결과 자동차 구동에 적당한 80kW급의 연료전지 스택이 자동차에 장착될 수 있는 크기로 개발되어 적용되고 있다.

프로톤 교환막 연료전지는 작동 온도가 낮아서 전극 반응을 원활히 하기 위해 백금과 같은 귀금속 촉매가 사용된다. 최근 연구 성과에 의해 귀금속 촉매 사용량이 초저공해차량의 배기가스 후처리장치에 사용되는 수준에 근접했지만, 이는 실험실에서의 수준으로서 향후 내구성을 확보하는 연구가 진행되어야 할 것으로

보인다. 한편, 이 귀금속 촉매는 일산화탄소, 황과 같은 성분에 쉽게 그 활성을 잃는다는 단점을 가지고 있다. 따라서 연료전지에 공급되는 연료의 성분은 이러한 물질이 수 또는 수십 ppm 이하로 관리되어야 한다. 프로톤 교환막의 연료로는 수소가 가장 좋은데 기존의 메탄올 또는 가솔린과 같이 액체 연료에서 수소를 생산하는 연료변환기를 사용할 경우, 이러한 촉매 피독 성분의 저감이 가장 중요한 설계 요소라고 할 수 있다.

현재 자동차용으로 적용되고 있는 프로톤 교환막의 경우, 프로톤 전도가 교환막 내에 흡수된 물을 매개로 이루어지므로 물의 관리가 필수적이다. 특히 공기극과 연료극 각각에 공급되는 반응 가스의 습도를 적절히 유지하는 것이 최적 운전의 관건이라고 할 수 있다. 물이 프로톤 교환막 연료전지의 성능에 가장 크게 기여하는 대신 빙점 이하에서의 보관 및 운전을 어렵게 하는 요소이기도 하다.

한편, 작동 온도가 높고 전해질이 산소 이온 전도체이므로 일산화탄소도 연료로 쓰일 수 있기 때문에 고

체산화물 연료전지는 그 시스템 구성상 연료변환 부담이 적다고 알려져 있다. 비록 재료의 선택 및 설계 기술의 제약이 있기는 하지만, 가솔린 또는 디젤을 연료로 하는 수 kW급 고체산화물 연료전지 시스템에 대하여 일반 내연기관차량의 보조 전원으로서의 적용 가능성이 탐색되고 있다. 작동 온도가 1,000℃ 내외인 기존의 고체산화물 연료전지에 비해 자동차용 고체산화물 연료전지의 경우 작동 온도는 700℃ 내외로 많이 낮아지긴 했어도 열사이클, 고온 내구성 등과 관련한 재료 및 제조공정과 관련한 해결과제가 많이 남아 있다.

연료전지 시스템 구성

수소와 산소로부터 전기를 생산하는 연료전지 스택은 연료를 연소하여 운동에너지로 바꾸어 주는 내연기관의 엔진본체에 비유될 수 있다. 동력발생장치인 내연기관에 연료 및 공기 공급, 냉각, 배기를 위한 장치로 구성된 엔진 운전 장치가 있듯이 전력발생장치인 연료전지 시스템에도 같은 기능을 하는 스택 운전

장치가 있다. 열 및 물질 수지 개념을 중요시 하는 화학 공정에서는 이를 Balance of Plant (BOP)라고 하기도 한다. 프로톤 교환막 연료전지 시스템의 스택 운전 장치는 크게 공기 공급 및 배기계, 연료공급계, 물관리 및 냉각계 등으로 구성되어 있다. <그림 1>에 내연기관 자동차와 연료전지 자동차의 구성요소를 비교하였다.

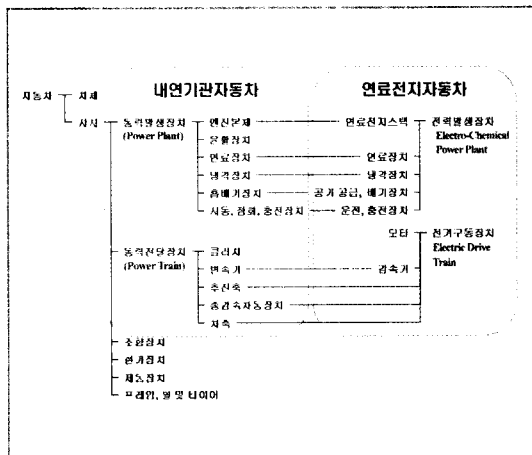
한편, 연료전지 자동차의 구동장치는 배터리 전기차와 같이 모터 및 감속기로 구성되어 있다. 연료전지 시스템을 내연기관 자동차의 엔진에 비유한다면, 전기구동장치는 내연기관 자동차의 동력전달장치와 같은 역할을 한다고 볼 수 있다. 다만 동력이 전기이고 전기구동장치는 전기에너지를 운동에너지로 변환시킨다는 것이 다른 점이라고 할 수 있다.

공기 공급 및 배기계

연료전지 시스템에서는 내연기관과 같이 피스톤의 행정 운동에 의해 공기를 흡입하는 기능이 없기 때문에 공기를 강제로 불어 넣어 주는 장치가 필요하다. 일반적으로 모터로 작동하는 송풍기 또는 공기압축기가 쓰인다.

자동차용 연료전지 시스템은 대부분 1~3기압에서 작동하도록 설계되어 있다. 공기공급기는 연료전지 운전에서 가장 많은 일을 필요로 하는 장치로서 연료전지 스택 최대 출력의 5~20%를 사용한다. 압축성 유체를 다루는 특성상 공기공급기의 운전 효율은 작동 압력에 민감하여, 일반적으로 상압 근처에서 운전할수록 유리하다. 가압하여 운전할 경우에는 연료전지 스택 배기에서 에너지를 회수할 수 있는 팽창기와 일축으로 연결된 공기압축기가 쓰이기도 한다.

자동차에 쓰이는 공기공급기는 그 장착성을 고려하여 작게 만드는 것이 필수적이다. 이를 위해 공기공급



<그림 1> 내연기관자동차와 연료전지자동차 구성 비교

기의 회전수가 분당 수만회에 이르도록 설계된다. 프로톤 교환막 연료전지에서는 공기공급기의 배어링 윤활에 쓰이는 윤활제가 촉매 또는 전해질을 오염시켜 성능을 저하시키는 우려가 있어, 윤활제가 필요없는 공기배어링의 적용 또는 효율적인 필터 설계가 필요하다.

연료계

연료전지 시스템의 연료로 수소를 직접 사용할 경우 연료 공급계는 비교적 간단하게 설계된다. 수소 저장 방법에 따라 다르기는 하지만, 대부분 수~수십 기압으로 공급되는 수소를 스택 입구에서 운전 압력으로 조절한다. 수소 저장 압력이 일반적으로 공기 공급 압력 보다 높기 때문에 수소 공급계 부품들의 파손 또는 오작동으로 인해 스택에 공기압보다 높은 수소가 공급되는 것에 대한 대책이 필요하다.

연료전지 스택에 공기와 연료를 공급할 때에는 스택의 성능 확보 및 수명 증대를 위해 전지 반응에 필요한 양보다 더 많이 공급한다. 이 때 스택에서 사용하고 남아 배출되는 수소를 재사용하여 연료의 낭비를 막아야 한다. 일반적으로 수소를 재순환하여 스택 입구 쪽으로 되돌리거나, 태워서 시스템 또는 차량에 필요한 열을 공급한다. 특히 스택을 통과한 미반응 수소를 재순환하는 기술은 연비 향상을 위해 매우 중요하다.

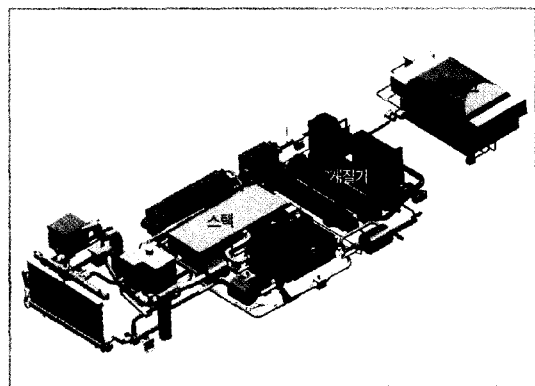
메탄올 또는 가솔린과 같은 탄화수소 연료에서 수소를 생산하여 연료전지에 공급할 경우에는 연료변환기에서 스택으로 공급되는 개질 가스의 조성 및 유량을 감시하여 스택이 적절한 운전 조건에서 작동될 수 있도록 해야 한다. 특히 개질 가스에는 수소 이외에 다량의 이산화탄소, 질소 등이 포함되어 있으므로 미반응 수소의 재순환이 어렵다. 이 경우 스택을 통과한 미반응 수소를 태워 연료변환기에 필요한 열을 공급하고 배출한다.

물 관리 및 냉각계

프로톤 교환막 연료전지는 전해질의 프로톤 전도성을 확보하기 위해 반응 가스의 습도 유지가 필요하다. 그렇지 않을 경우, 프로톤 교환막이 건조하게 되고 전도성을 상실하게 되어 결국은 연료전지 스택의 수명을 단축하게 된다. 반응 가스의 가습을 위해 가습기를 사용하는데, 유량이 많은 공기의 가습이 수소보다 상대적으로 어렵다. 가습을 위해 필요한 열량은 수십 kW에 이르며 이를 스택에서 생산된 전력으로 공급하는 것은 불가능하다. 주로 반응 기체와 물의 습도 차이에 의한 물의 자연 증발을 이용하는 것이 전체 연료전지 시스템의 효율을 높일 수 있는 방법이다. 이 경우 가습기 설계에 있어 물과 반응기체가 만나는 면적을 넓혀주는 방법이 중요하다.

가습에 필요한 물은 전지 반응에 의해 공기극 가스에 포함된 물을 회수하여 사용하는 것이 일반적이다. 연료변환기를 사용할 경우에 물이 더 필요하므로 물 회수량이 더 많아야 한다. 공기극 가스를 냉각하여 생긴 응축수를 회수하는데 있어, 냉각계에 부담이 될 정도로 큰 열량을 냉각해야 한다.

연료전지 스택 발전에 대한 열효율이 약 60~70%로 기존 내연기관에 비해 월등하여 폐열량은 상대적으로



(그림 2) 차량 구동용 연료전지 시스템 구성

로 적지만, 배기 가스가 가지고 나가거나 시스템의 몸체를 통해 발산되는 열량이 작기 때문에 스택의 냉각수에 의한 냉각량은 내연기관에 비해 적지 않다. 특히 작동 온도가 내연기관 보다 낮기 때문에 냉각수와 대기의 온도차가 작아서 라디에이터를 통한 열교환 능력이 작아지게 된다. 연료전지자동차의 냉각 시스템이 기존 내연기관차에 비해 커지는 이유가 바로 여기에 있다. 차량의 장착성을 고려하며 대기와의 열교환 능력을 극대화 할 수 있는 라디에이터 설계가 요구된다.

〈그림 2〉에 연료변환기가 포함된 자동차 구동용 연료전지 시스템 구성의 예를 나타내었다. 시스템 주요부가 차량 하부에 장착된 경우를 보여주고 있다. 현재는 모든 부품들이 기능 중심으로 개발되고 있기 때문에 부품들이 배관으로 연결되도록 설계되어 있는 것이 일반적이다.

연료전지 시스템 운전

주어진 온도 및 압력 조건에서 연료전지 스택의 효율은 이론적으로 전류가 없는 개회로에서 최대이다. 프로톤 교환막 연료전지에서 개회로에서 약 75%에 이르고 반응이 일어나고 전류가 흐름에 따라 확산 손실, 저항 손실 등에 의해 그 효율이 감소한다.

스택 운전 장치를 포함한 연료전지 전체 시스템의 효율을 고려할 경우, 아이들 상태에서는 연료전지 발전 전력을 모두 시스템 운전에서 사용하고 밖으로는 일을 하지 않기 때문에 0(영)이고, 출력이 증가함에 따라 증가한다. 내연기관에서는 최대 출력 가까운 곳에서 효율이 최대이지만, 연료전지 시스템에서는 최대 출력의 10~20%에서 그 효율이 최대인 것이 내연기관과 가장 큰 차이라고 할 수 있다. 수소를 연료로 사용하는 프로톤 교환막 연료전지 시스템의 최대 효율은 약 60%에 이른다. 최대 효율 출력은 대개 연료전지

스택의 운전 소비 전력에 따라 달라지는데, 운전 소비 전력의 대부분을 차지하는 공기공급기의 효율이 이를 결정한다. 일반적으로 시스템 운전 압력이 낮을수록 최대 효율 출력이 낮아진다.

도심을 주행하는 승용차의 경우, 엔진의 실부하 평균은 전체 출력의 10%미만으로 알려져 있다. 이 영역은 연료전지시스템의 최대 효율 운전 영역에 해당하므로, 최대 효율 영역이 최대 출력에 가까운 곳에 있는 내연기관에 비해 운전 특성 자체도 훨씬 유리하다고 할 수 있다.

최근에는 아이들에서 최대 효율 출력 영역에서의 운전 효율을 극대화 하기 위해 이차전지(배터리)를 연료전지 시스템과 병렬로 연결하는 하이브리드 시스템이 개발되고 있다. 연료전지-배터리 하이브리드 시스템의 운전 전략은 내연기관-배터리 하이브리드 시스템과 유사하다.

〈표 1〉에 싼타페의 열효율을 동력원을 달리할 경우에 대하여 비교해 놓았다. 먼저, 가솔린 또는 디젤의 경우에는 정유 과정만을 거치기 때문에 연료 생산 과정(Well to Tank)에서의 열효율은 수소 생산 과정보다 매우 높다. 수소의 경우에는 자연적으로 존재하는 연료가 아니기 때문에 현재의 기술로 가장 손쉽게는 기존의 화석 연료로부터 만들어야 한다. 따라서 그 생

〈표 1〉 열효율 비교(美 FUDS 모드 기준)

싼타페 기준 (%)	Well to Tank (Fuel Production Efficiency)	Tank to Wheel (Vehicle Efficiency)	Overall Efficiency
Gasoline (129kW, AT)	88	18	16
Diesel (94kW, AT)	89	22	20
FCEV	75 (천연가스-수소)	48	36
FCHEV (목표)	70 (수소생산평균목표)	60	42

산 효율이 상대적으로 매우 낮다. 반면, 연료전지 시스템의 열효율이 내연기관에 비해 우수하기 때문에 연료전지 자동차의 열효율이 내연기관 자동차의 것에 비해 매우 높다. 비록 수소 생산 과정에서의 열효율이 불리하다고 하더라도 연료전지 자동차의 전체 열효율 역시 내연기관 자동차의 것에 비해 높다는 것을 알 수 있다. 한편, 연료전지-배터리 하이브리드 자동차(FCHV)의 경우에 연료전지 시스템의 고효율 운전과 회생제동에 의해 자동차 주행 열효율이 연료전지 시스템만으로 구성된 차량(FCEV)에 비해 획기적으로 개선된다는 것을 확인할 수 있다.

실용화 과제

자동차 구동용으로의 응용이 탐색되고 있는 프로톤 교환막 연료전지 시스템의 실용화를 위한 가장 큰 기술적 과제는 작동 온도의 고온화와 빙점 이하 보관 및 시동에 있다.

작동 온도의 고온화는 150℃ 내외에서 작동이 가능한 프로톤 교환막 개발을 통해서만이 가능하다. 이 경우 물을 매개로한 기존의 프로톤 전도 특성에서 탈피

할 수 있어 기습 및 반응 생성수의 제거 문제가 해결된다. 특히 작동 온도가 올라가면 전기 반응 활성화에 의해 귀금속 촉매 사용량을 줄이고 피독 문제를 완화할 수 있다. 또 냉각수 온도를 높힐 수 있어 크기가 작은 냉각 시스템의 설계가 가능하다.

물 관리가 필요한 현재의 프로톤 교환막 연료전지의 경우, 물의 동결에 의한 연료전지 전극 구조의 파파나 스택 운전 장치의 손상이 없어야 한다. 또한 신속한 시동 및 적정 운전 온도 도달을 위해 연료전지 시스템을 가열하는 것이 필요하다. 신속한 시동은 차량의 연비를 결정하는 중요한 요소로서 시스템 부피 및 무게 삭감을 위한 연구개발이 필요하다.

현재의 연료전지 시스템 개발 수준을 보면 성능 측면에서 연료전지 시스템이 차량 구동용으로 적용가능성에 대해서는 이미 검증이 끝난 것으로 보인다. 그리고 실용화를 위한 각종 기술적 과제들이 파악되고 이를 해결하기 위해 개발 전략들이 수립되었고 투자가 진행되고 있다. 특히 지금까지 성능 향상이 개발의 중심이어서 상대적으로 관심이 적었던 연료전지 스택을 포함한 시스템의 내구성 확보와 양산에 적합한 가격 도달을 위한 연구 개발이 한참 진행 중에 있다.

(이기춘 선임연구원 : kichun@hyundai_motor.com)