

## 전기화학엔진의 구성 및 응용

- 이 기 춘 | 현대자동차 선행개발센터, 선임연구원  
e-mail : kichun@hyundai-motor.com
- 임 태 원 | 현대자동차 선행개발센터, 수석연구원

이 글에서는 연료의 전기화학적 연소에 의해 연료가 가지고 있던 화학에너지를 전기에너지로 직접 변환시켜주는 연료전지 시스템의 구성과 그 응용에 관하여 소개하고자 한다.

수소와 산소가 반응하여 물이 만들어지는 과정에 전기를 생산할 수 있는 전기 화학 장치가 발명된 것은 1839년 법률가이자 과학자인 William Grove 경에 의해서이다. 전기를 가하여 물을 수소와 산소로 분해하는 물의 전기분해 실험을 통해 이의 역반응도 가능할 것이라는 예상으로 만들어진 것으로서 그로브 경은 이 장치를 '가스 불타 전지'라고 불렀다. 오늘날 그로브 전지라고도 불리는 이 장치는 '연료전지(fuel cell)'의 시초라 일컬어지고 있다.

연료전지라는 용어가 처음 사용된 것은 1889년 Ludwig Mond와 Charles Langer에 의해서이다. 그로브 전지에서 수소와 산소 대신에, 석탄가스와 공기를 사용하는 실용적인 장치를 발명하였고 이를 연료전지라고 이름 지었다.

19세기 후반에 이루어진 열역

학의 발전을 통해서 전기화학에너지와 열에너지 사이의 관계가 이해되었고, 1894년 Ostwald는 저가의 에너지를 공급하는 방법이 전기화학에 있다고 발표하기도 하였다.

최초의 대규모 연료전지 개발 프로젝트는 Francis Bacon이 1932년에 시작하여 1959년에 완성한 알칼리 연료전지로서, 5kW급 발전시스템으로 용접기, 회전톱, 지게차 등에 전력을 공급하는 시연을 하기도 하였다.

1960년대 이후 연료전지는 미 항공우주국의 우주선 전기동력 발생장치, 소규모 발전용 시스템 등으로 응용되어 왔다. 특히 1997년 이후 대부분의 자동차 회사들이 성능이 내연기관차에 근접한 연료전지차를 발표하면서 그 응용의 확대가 기대되고 있다.

이 글에서는 자동차용 연료전지 기술에 대하여 간략하게 소개

하고자 한다.

### 연료전지 작동 원리

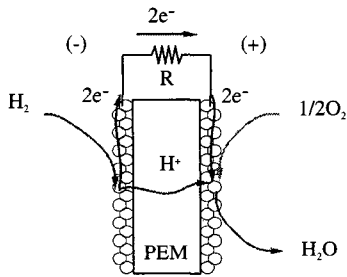
물에 직류 전기를 흘려주면 물이 분해되어 수소와 산소가 된다. 반대로 수소와 산소를 반응시키면 전기와 물이 생길 수 있다. 연료전지는 바로 이러한 현상을 이용한 것이다. 전기를 잠시 화학에너지로 저장하는 일반 전지와 달리 연료전지는 연료로부터 직접 전기를 생산하는 에너지 변환장치이다.

수소와 산소를 직접 만나게 하면 급격한 반응이 일어나 물과 열이 만들어진다. 연료전지는 수소와 산소를 직접 만나게 하지 않고 이온 상태로 만나게 해서 물과 전기를 만든다. 이 역할은 이온 전도체인 전해질이 담당하는데, 설명의 편의상 수소를 이온 상태로만 통과시키는 프로톤 교환막의

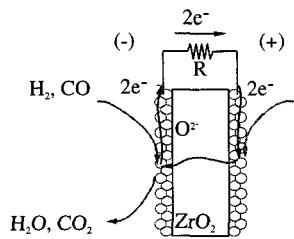
예를 들겠다.

프로톤 교환막을 사이에 두고 수소와 공기를 흘려주었을 때, 수소가 교환막과 만나면 전자를 내주면서 이온(프로톤)이 된다. 프로톤은 교환막을 지나가고 전자는 외부로 연결된 도선을 타고 반대쪽 공기 있는 곳으로 간다. 공기 중의 산소와 교환막을 지나온 프로톤, 전극을 타고 온 전자들이 만나 물이 된다. 외부의 도선을 타고 전자가 이동할 때 전자는 전구의 불을 밝힌다든지 모터를 돌린다든지 하는 일을 한다.

수소가 전자를 내주면서 이온이 된다든지, 프로톤이 산소와 만나면서 물이 된다든지 하는 반응은 잘 일어나지 않기 때문에 촉매를 이용한다. 프로톤 교환막 표면에는 촉매를 잘 분산한 전극 물질



프로톤 교환막 연료전지 작동 원리 (PEM ; Proton Exchange Membrane)



고체산화물 연료전지 작동 원리

물에 직류 전기를 흘려주면 물이 분해되어 수소와 산소가 된다. 반대로 수소와 산소를 반응시키면 전기와 물이 생길 수 있다. 연료전지는 바로 이러한 현상을 이용한 것이다. 전기를 잠시 화학에너지로 저장하는 일반 전지와 달리 연료전지는 연료로부터 직접 전기를 생산하는 에너지 변환장치이다.

이 발라져 있어 전자도 잘 흐르게 하고 반응도 고르고 빠르게 일어나게 한다.

### 작동작용 연료전지

연료전지의 종류는 전해질의 종류로 나뉘는 것이 일반적으로, 프로톤 교환막, 알칼리, 인산, 용융탄산염, 고체산화물 등이 연료전지 전해질로 쓰인다. 이들 전해질은 각각의 작동 온도에서 액체 또는 고체 상태로 존재하는데, 운전 및 정지를 반복하는 자동차용에는 작동 온도까지 상변화가 없는 고체 전해질이 유리하다고 할 수 있고, 프로톤 교환막과 고체산화물이 바로 그것이다.

프로톤 교환막 연료전지는 다른 종류의 연료전지 보다 작동온도가 80°C 이하로 낮고, 단위전지 면출력밀도가 커서 현재 자동차용으로 가장 많이 개발되고 있다. 그 결과 자동차 구동에 적당한 80kW 내외의 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.

프로톤 교환막은 또한 작동온도가 낮아서 귀금속 촉매가 일산화탄소, 황과 같은 성분에 쉽게 그 활성을 잃는다는 단점이 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 중요할 설계 요소라고 할 수 있다.

현재 자동차용에 적용되고 있는 프로톤 교환막의 경우, 프로톤 전도가 교환막 내에 흡수된 물을 매개로 이루어지므로 물의 관리가 필수적이다. 특히 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.

고체산화물 연료전지의 경우 작동 온도가 700°C 내외로, 구성 물질이 대부분 세라믹스 또는

고온 내부식성이 우수한 금속으로 구성되어 있다. 귀금속 촉매를 사용하지 않는다는 장점이 있는 하지만, 스택을 설계할 때 열 사이클, 고온 내구성과 관련한 재료 문제를 해결해야만 한다.

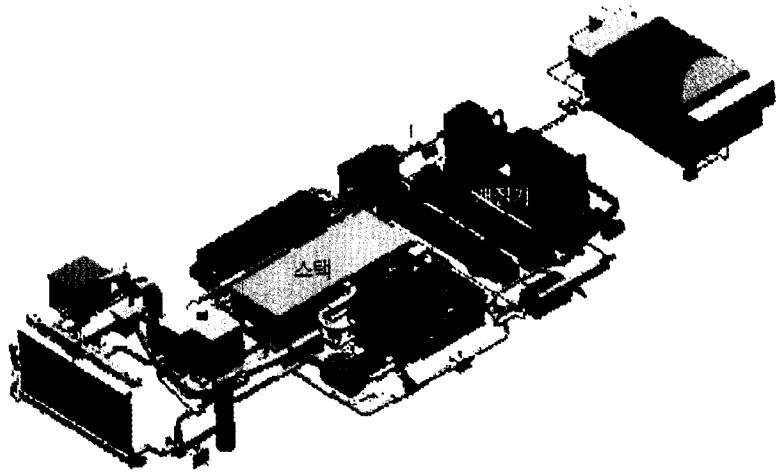
작동온도가 높고 전해질이 산소 이온 전도체이므로 일산화탄소도 연료로 쓰일 수 있기 때문에, 고체산화물 연료전지는 그 시스템 구성상 연료변환 부담이 적다고 알려져 있다. 현재 재료의 선택 및 설계 기술의 제약에 의해, 수 kW급의 가솔린을 연료로 하는 일반 내연기관차량의 보조 전원으로서의 응용이 탐색되고 있다.

### 연료전지 시스템 구성

수소와 산소로부터 전기를 생산하는 연료전지 스택은 연료를 연소하여 열로 바꾸어 주는 내연기관의 엔진에 비유될 수 있어 전기화학 엔진이라고 불린다. 내연기관에 연료 및 공기 공급, 냉각, 배기를 위한 장치로 구성된 엔진 운전장치가 있듯이, 연료전지 시스템에도 같은 기능을 하는 스택 운전장치가 있다. 열 및 물질 수지 개념을 중요시 하는 화학 공정에서는 이를 **Balance Of Plant (BOP)**라고 하기도 한다.

프로톤 교환막 연료전지 시스템의 스택 운전장치는 크게 공기 공급 및 배기계, 연료공급계, 물 관리 및 냉각계 등으로 구성되어 있다.

### 공기 공급 및 배기계



차량 구동용 연료전지 시스템 구성  
(시스템 주요부가 승용차 하부에 장착된 경우)

연료전지 시스템에서는 내연기관과 같이 피스톤의 행정운동에 의해 공기를 자연스럽게 흡입하는 기능이 없기 때문에, 공기를 강제로 불러 넣어 주는 장치가 필요하다. 일반적으로 모터로 작동하는 송풍기 또는 공기압축기가 쓰인다.

자동차용 연료전지 시스템은 대부분 1~3기압에서 작동하도록 설계되어 있다. 공기공급기는 연료전지 운전에 있어 가장 많은 일을 필요로 하는 장치로서, 연료전지 시스템 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 만드

는 것이 필수적이다. 이를 위해 공기공급기의 회전수가 분당 수만 회에 이르도록 설계된다. 프로톤 교환막 연료전지에서는 공기공급기의 베어링 윤활에 쓰이는 윤활제가 촉매 또는 전해질을 오염시켜 성능을 저하시키는 우려가 있어, 윤활제가 필요없는 공기 베어링의 적용 또는 효율적인 필터 설계가 필요하다.

### 연로계

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 개질가스의 조성 및 유량을 감시하여 스택이 적절한 운전 조건에서 작동될 수 있도록 해야 한다. 특히 개질가스에는 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 결국 연료전지 스택의 수명을 단축하게 된다. 반응 가스의 가습을 위해 가습기를 사용하는데, 유량이 많은 공기의 가습이 수소보다 상대적으

수소와 산소로부터 전기를 생산하는 연료전지 스택은 연료를 연소하여 열로 바꾸어 주는 내연기관의 엔진에 비유될 수 있어 전기화학 엔진이라고 불린다. 내연기관에 연료 및 공기 공급, 냉각, 배기를 위한 장치로 구성된 엔진 운전장치가 있듯이, 연료전지 시스템에도 같은 기능을 하는 스택 운전장치가 있다.

로 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 열 효율이 약 60~70%로 기존 내연기관에 비해 월등하여 폐열량은 상대적으로 적지만, 배기가스가 가지고 나가거나 시스템의 물체를 통해 발산되는 열량이 작기 때문에 스택의 냉각수에 의한 냉각량은 내연기관에 비해 적지 않다. 특히 작동 온도가 내연기관 보다 낮기 때문에, 냉각수와 대기 온도 차이가 작아서 라디에이터를 통한

열교환 능력이 작아지게 된다. 연료전지차의 냉각 시스템이 기존 내연기관차에 비해 커지는 이유가 바로 이것이다. 차량의 장착성을 고려하며 대기와의 열교환 능력을 극대화할 수 있는 라디에이터의 설계가 요구된다.

### 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 운전장치를 포함한 연료전지 전체 시스템의 효율을 고려할 경우, 아이들 상태에서는 연료전지 발전 전력을 모두 시스템 운전에 사용하고 밖으로는 일을 하지 않기 때문에 0(영)이고, 출력이 증가함에 따라 증가한다. 내연기관에서는 최대 출력에서 효율이 최대이지만, 연료전지 시스템에서는 최대 출력의 10~20%에서 그 효율이 최대인 것이 내연기관과 가장 큰 차이이다. 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.

### 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°C 내외에서 작동이 가능한 프로톤 교환막 개발을 통해서만이 가능하다. 이 경우 물을 매개로 한 기존의 프로톤 전도 특성에서 탈피할 수 있어 기습 및 반응 생성수의 제거 문제가 해결된다. 특히 작동온도가 올라가면 전지 반응 활성화에 의해 귀금속 촉매 사용량을 줄이고 피독 문제를 완화할 수 있다. 또 냉각수 온도를 높일 수 있어 크기가 작은 냉각 시스템의 설계가 가능하다.

물 관리가 필요한 현재의 프로톤 교환막 연료전지의 경우, 물의

동결에 의한 연료전지 전극 구조의 파괴나 스택 운전장치의 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 한창 진행 중에 있다.

#### ▶ 노심용융물 고압분출(HPME : High Pressure Melt Ejection)

핵연료의 용융에 의해 노심 용융물(corium)이 원자로 압력용기(RPV : Reactor Pressure Vessel) 하부로 흘러내려 고압인 상태에서 파손되면, 고온 고압의 노심 용융물이 하부에 있는 원자로 캐버티(cavity)를 통해 격납건물(containment)의 대기로 급격히 방출된다. 이와 같이 노심용융물이 빠른 속도로 캐버티로 분출되며, 격납건물 하부의

구조물을 거쳐 상부대기로 분산되는 현상을 노심용융물 고압분출이라고 한다.

#### ▶ 관내 연선도체(Cable-In-Conduit Conductors)

초전도 자석을 구성하는 기본적인 단위로서 초전도, 선재와 구리로 만들어진 소선들, 냉각시 사용되는 유체의 통로들, 소선들과 유체의 통로를 유지할 수 있는 외벽 형태의 관으로 구성된다.