

# 맥동 유동을 이용한 고분자 전해질막 연료전지의 성능 향상에 관한 연구

맥동 유동의 특징은 무엇인지 간략히 소개하며, 연료전지의 운전 방법을 개방형과 폐쇄형으로 나누어 맥동 유동이 각각의 운전 방법에 어떠한 영향을 미치는지 소개하고자 한다.

최 종 원

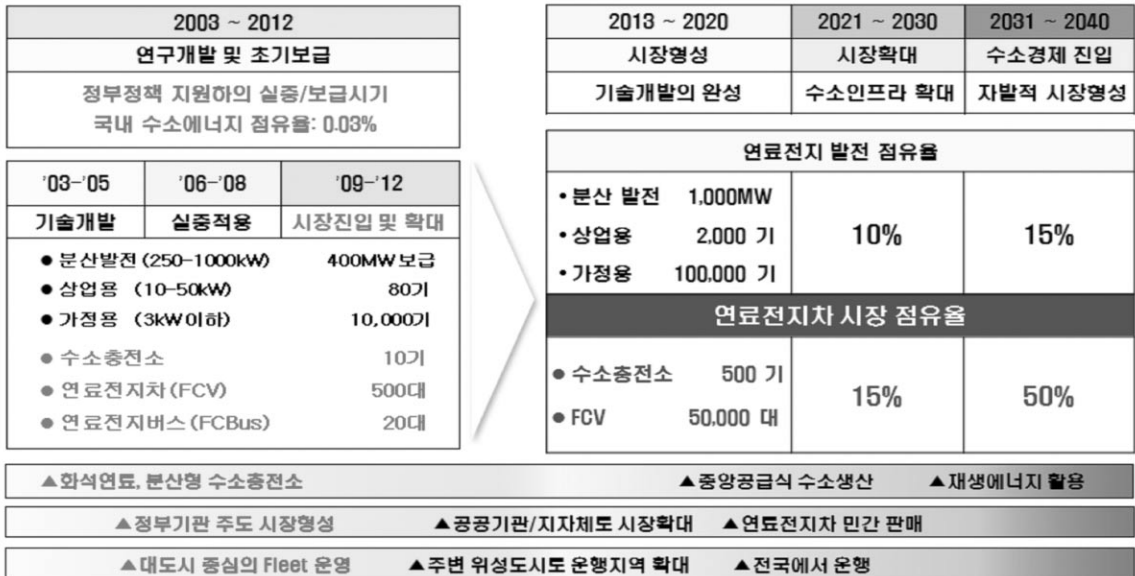
ETH Zurich, Department of Mechanical and Process Engineering

박사후 연구원(jochoi@ethz.chr)

## 연구 배경

최근 들어 다시 불거져 나오는 국제적인 유가의 불안정, 기후변화협약 규제 및 대응 등의 문제로 신·재생에너지로의 이목이 집중되고 있다. 신·

재생에너지는 한 국가의 미래 산업을 결정지을 수 있을 만큼 경제적으로 매우 고부가가치에 해당하지만, 초기투자의 규모가 매우 크고, 지속적인 에너지 생산이 어려우며 운전을 위해 새로운 에너지가 추가로 공급되어야 하는 점 때문에 아직까지는



[그림 1] 국내 연료전지 보급 계획 (지식경제부 한국 수소경제 Vision 2030)

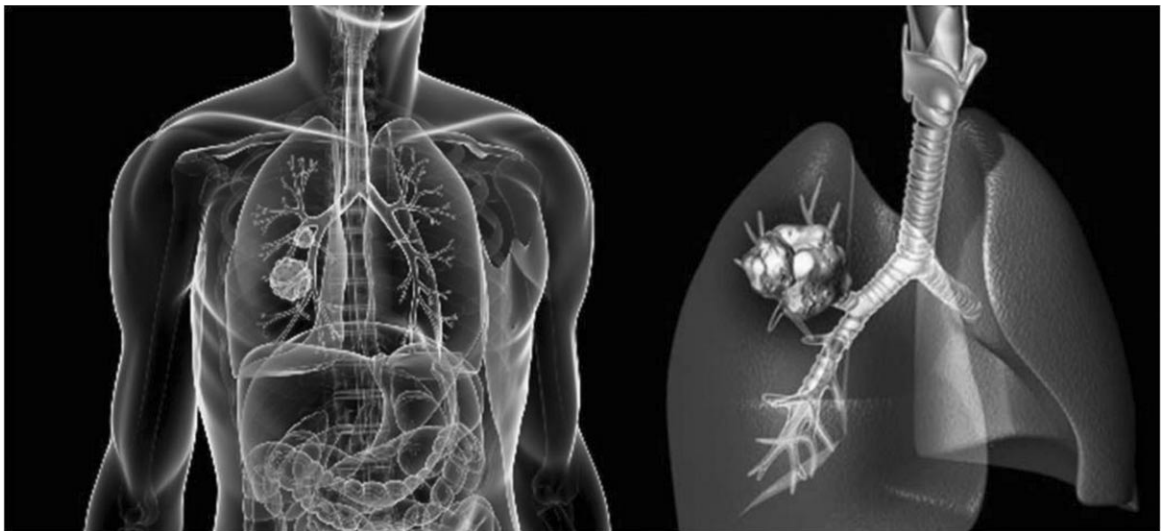


실생활에서 활발하게 이용되지 못하고 있다. 그 중 연료전지는 내연 기관에 의한 환경오염 및 원유 수급의 문제점을 해결할 수 있는 새로운 에너지가 될 수 있으며, 기존에너지에 비해 효율이 월등히 높아 재료의 가격 경쟁력을 높이고 보다 효율적인 운전 방법을 찾게 된다면 실생활에서 가장 밀접한 과급효과를 가져올 수 있는 에너지 중 하나이다. 또한, 그림 1에서 알 수 있는 것과 같이 국내에서는 가까운 미래에 연료전지 시스템의 시장을 형성하고 2030년 이후에 수소 경제로의 진입을 목표로 수소 연료전지 시스템 보급 사업을 하고 있는 실정이다.

### 고분자 전해질막 연료전지의 운전 방법 및 각각의 장단점

연료전지기술의 적용형태는 발전용량에 따라서 휴대용, 가정용, 수송용, 발전용으로 나눌 수 있지만, 그 운전 방법에 따라서는 연료측 출구의 개폐 여부에 따라 개방형 모드와 폐쇄형 모드로 나눌 수가 있다. 개방 모드로 운전되는 연료전지의 경우 안정적인 전력을 얻을 수 있으며 연료전지 내부에 반응과 관계가 없는 물질이 생겼을 경우 즉

각적으로 배출해 줄 수 있는 장점이 있다. 하지만, 채널 내부에서 생성된 물을 원활하게 배출해주고 채널 후단에서 농도가 알아지는 것을 막기 위해서 당량비(stoichio-metric ratio)를 1.5 ~ 3배 이상으로 공급하는 것이 일반적인 운전 방법이었다. 따라서 채널로부터 다공성 막으로 보다 효율적으로 확산이 될 수 있고 적은 양의 연료로도 물의 배출이 원활하게 될 수 있다면 연료전지 운전 장치에 소모되는 전력을 크게 절약할 수 있게 된다. 한편, 휴대용 연료전지 등 작은 스케일에 많이 적용되는 수소측 폐쇄 모드 연료전지는 별도의 가습기 및 연료 재순환 시스템이 필요 없으며, 탱크로부터의 압력 조절기(regulator)와 출구의 밸브에 의해서만 운전이 되므로 개방 모드에 비해 시스템이 단순해지고 높은 성능을 얻을 수 있는 장점이 있다. 하지만, 채널 내부에서 반응 후 생성된 물이 일정량 이상 쌓이게 되면 내부의 촉매가 비가역 과정을 일으켜 손상될 수 있으며, 과도한 물의 양은 채널로부터 다공성 막으로 들어가는 연료의 공급을 막을 수 있으므로 적당한 선에서 물을 배출하기 위해 주기적으로 퍼지(periodic purge)를 해야 한다. 하지만 이때, 퍼지 밸브가 열려 있는 동안 내부의 물 뿐 아니라, 반응되지 않은 수소도 함



[그림 2] 맥동 호흡으로 산소를 각각의 혈관에 전달하는 폐

게 배출되어 연료전지의 연료 이용 효율이 나빠지게 되는 점은 수소측 폐쇄 모드 운전의 단점이라고 할 수 있다.

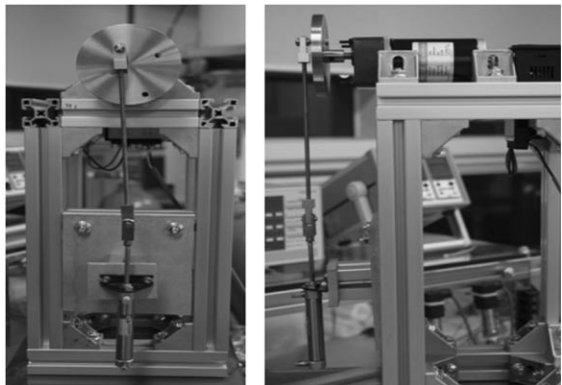
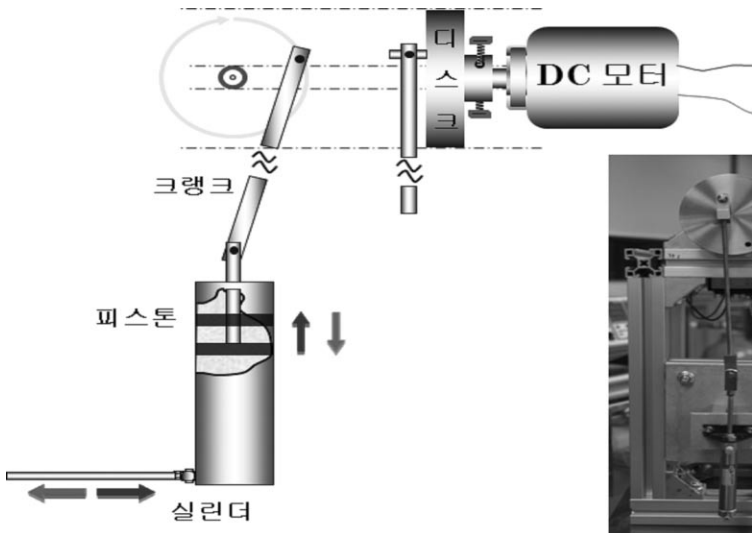
### 맥동 유동 공급시 개방형 연료전지의 성능 특성 실험

그림 2에서 보는 것과 같이 “자연은 인체의 순환계에서 혈관으로 산소의 효과적인 확산을 위해 맥동 유동(pulsation) 호흡을 선택하였을까”라는 질문으로 시작하는 본 연구는 기존의 연료전지 시스템 내부에 공급되는 연료가 인체의 호흡과 같은 층류 유동(laminar flow)인 점에 착안하여, 연료전지 채널 내부에서 연료의 확산율(effective diffusivity)을 높이고, 또한 반응 후 생성되는 물의 배출을 원활히 시키기 위해 유체의 공급 방법을 맥동 유동(pulsating feed)으로 선택하였다.

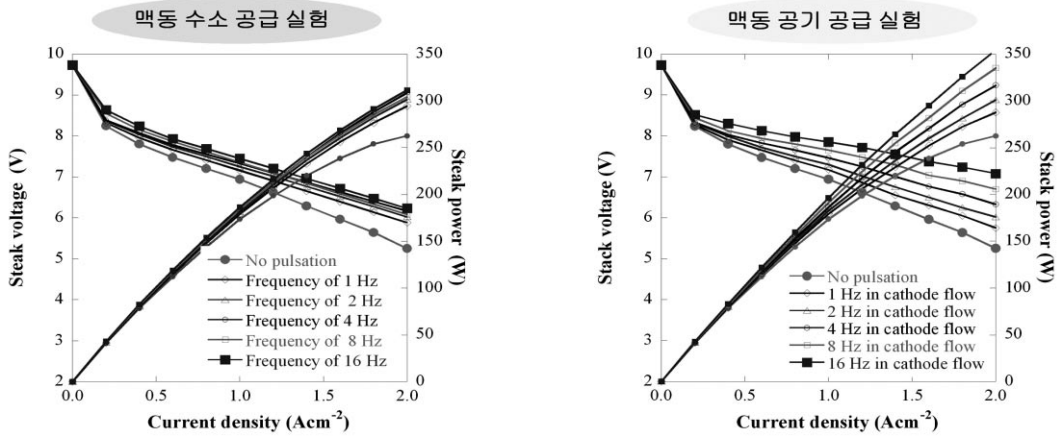
기존의 맥동 유동에 관한 많은 실험 및 해석 논문에는 맥동 효과로 인하여 농도의 분포를 균일하게 할 수 있으며 분자 자체가 가지고 있는 확산율을 3~4배 이상 증가시킬 수 있다고 나와 있기 때문이다. 만일, 적은 유량으로도 연료전지의 반응률을 높이고 물의 배출을 원활하게 할 수 있다면

연료전지의 운전 장치 중 가장 많은 전력을 소모하는 핵심 부품인 블로워의 전력을 대폭 줄일 수 있으며 이는 시스템의 크기와 무게 문제로도 귀결이 되기 때문이다. 흐르는 유체에 맥동을 가하는 방법은 여러 가지가 있을 수 있으나, 본 연구에서는 그림 3과 같이 모터와 실린더, 피스톤을 이용하여 맥동 발생 장치를 만들었다. 물론 기계적인 손실이 많이 있을 수 있으나 이는 향후 추가적인 연구를 통하여 보다 소음이 적고 효율이 높은 맥동 발생 장치를 꾸밀 수 있을 것이라 생각한다.

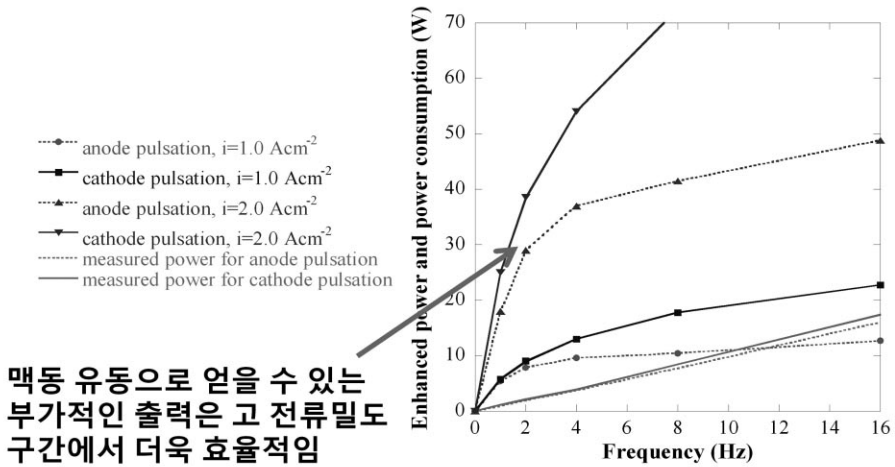
실험은 단위셀과 연료전지 스택을 대상으로 각각 양극과 음극에 맥동을 가하며 성능 변화를 측정하였다. 그림 4과 같이 양극과 음극의 맥동 실험 모두 주파수가 상승함에 따라 연료전지의 성능이 좋아졌으며 양극의 경우 반응 후 생성된 물을 잘 배출시켜줌으로써 성능이 더 크게 증가한 것을 알 수 있다. 맥동 주파수에 의한 영향은 헤더 효과에 의해 유량 불균형이 생기는 연료전지 스택이 단위셀 보다 훨씬 크게 나타났다. 맥동 유동이 헤더 안에서의 연료 농도를 균일화시켜 각각의 셀간의 농도 분극 차이를 줄여주었기 때문이다. 또한, 그림 5와 같이 일정 전류 밀도 이상의 구간에서는 맥동을 가하는데 소모된 에너지 보다 연료전지



[그림 3] 맥동 발생 장치



[그림 4] 음극 및 양극에 액동 유동 주파수를 바꾸어 가며 측정된 연료전지의 성능 변화



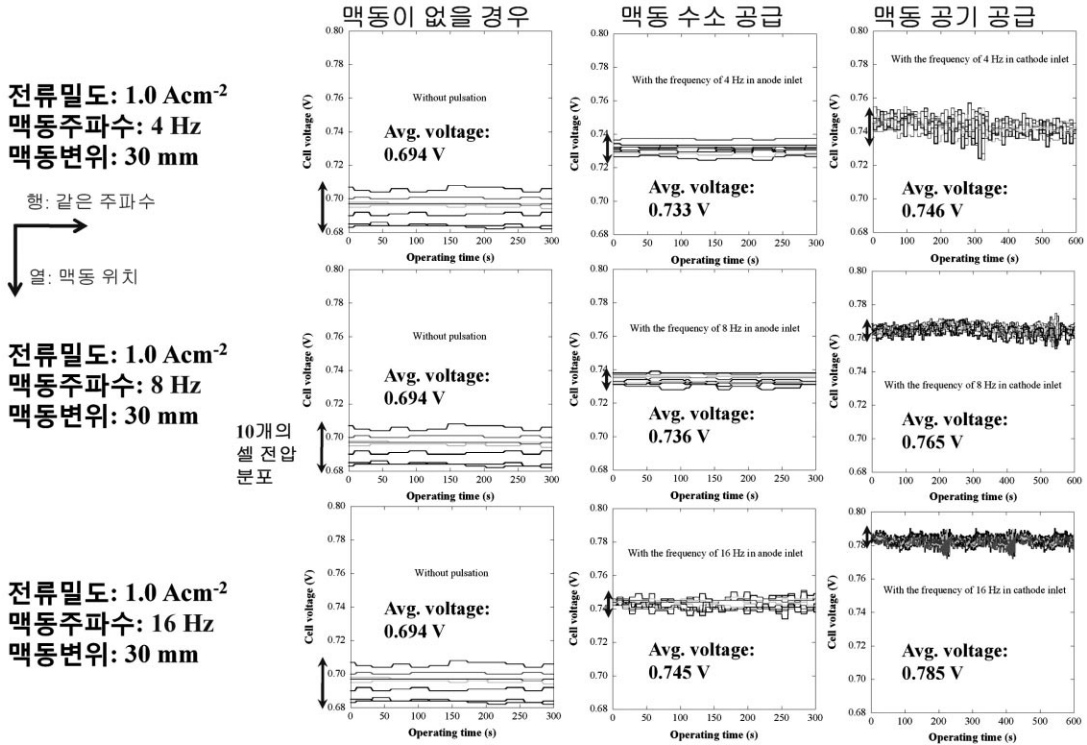
[그림 5] 액동 발생 장치에 소모된 전력과 증가된 연료전지의 성능 비교

를 통해 새롭게 얻을 수 있는 에너지가 크게 나타남을 알 수 있었다. 이로부터 공급 유체에 맥동을 가함으로써 유효확산계수(effective diffusivity)를 높여 다공성 막으로 들어가는 저항을 줄여줘 같은 유량을 공급하더라도 촉매층에 도달하는 산소 및 수소의 농도가 증가하게 되어 높은 성능을 얻을 수 있었고 물로 인해 생기는 플러딩 문제를 하였음을 유추할 수 있다. 하지만 그림 6에서 보는 것과 같이 시간에 따른 전압 거동을 살펴볼 때 높은

주파수로 갈수록 오르내림(fluctuation)이 심해지는 것을 볼 수 있었으며 향후 요동이 심한 전압 특성이 연료전지의 내구성에 어떠한 영향을 미칠 것이며, 향후 효율이 높고 소음이 적은 맥동 발생 장치를 설계하는 것은 새로운 과제가 될 것이다.

### 맥동 유동 공급시 폐쇄형 연료전지의 성능 특성 실험

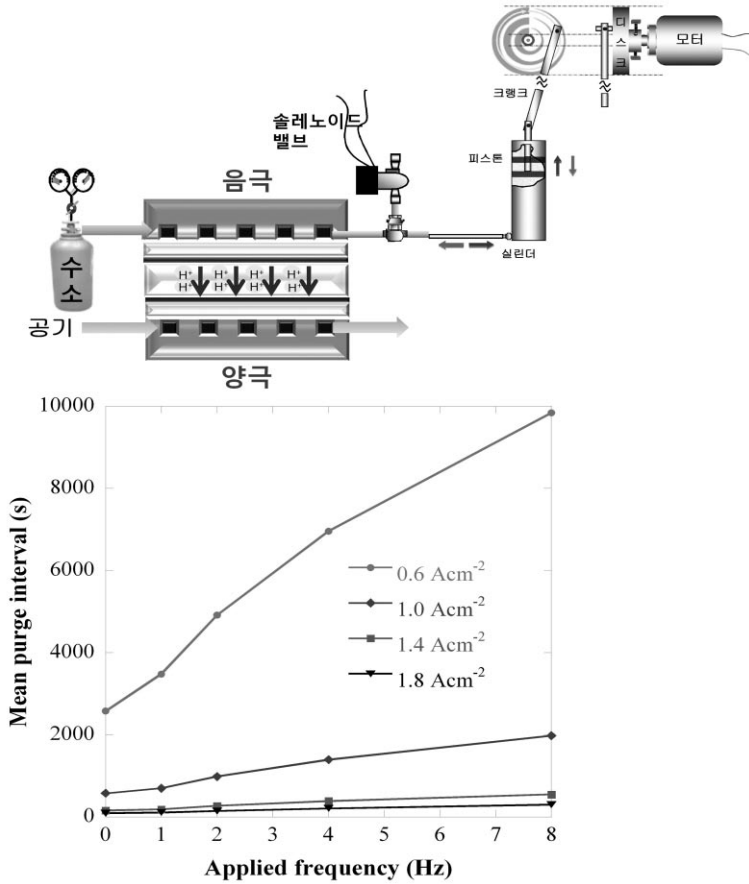
폐쇄형 연료전지에 관한 연구는 거의 없어 성능



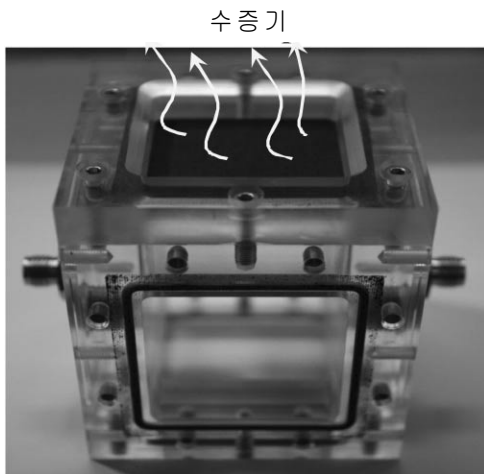
[그림 6] 주파수 변동에 따른 음극 및 양극의 전압 특성 비교

에 영향을 미치는 인자 역시 알려진 것이 없다. 본 연구에서는 앞서 말한 폐쇄형 연료전지의 단점을 해결하기 전에 먼저 폐쇄 모드로 운전되는 연료전지의 기본적인 퍼지 특성을 작동 환경에 따라 알아보았다. 퍼지 주기는 수소측 채널 내부의 질소 농도에 큰 영향을 받지 않았지만, 내부의 습도에 굉장히 큰 반응을 한 것을 알 수 있다. 이 결과로 인하여 폐쇄 모드 연료전지의 퍼지 특성을 개선하기 위해서는 능동적인 물관리가 중요하다는 것을 알 수 있다. 따라서 폐쇄 모드 연료전지의 단점을 해결하고자 연료전지의 후단에 맥동 유동을 가하여 주파수를 변화시키며 내부에서 생성되는 수증기의 농도 분포를 얇게 퍼뜨림으로써 국소적으로 수증기의 농도가 높아져 액상의 물이 되는 것을 방지하였다. 완전히 가습이 된 수소를 공급하며 주파수를 8 Hz까지 높였을 때 퍼지 주기는 그림

7과 같이 맥동이 없을 경우에 비해 약 4~5배 이상 길어졌고, 이로 인해 맥동 발생 장치의 전압을 고려하더라도 연료 이용 효율이 기존에 비해 4% 이상 향상되었다. 또한 무가습된 수소를 사용할 경우에는 운전 초반의 발생 전력은 다소 낮았지만, 시간이 지남에 따라 맥동을 통하여 수소측 채널 후단의 수증기를 전단으로 보내줌으로써 채널 안에 전반적인 가습특성을 향상시켰고, 연료전지의 전압 출력 성능을 좋게 하였다. 이때 퍼지 주기는 무려 120배나 증가했으며 연료 이용 효율은 8% 이상 향상이 되었다. 하지만, 맥동 발생 장치를 항상 사용하는 것 또한 외부에서 새로운 에너지를 공급하는 것이므로 수동적으로 물을 관리할 수 있는 방법을 고안해 보았다. 그림 8에서 보는 것과 같이 물을 선택적으로 투과할 수 있는 성질로 잘 알려진 나피온막을 이용한 구조물을 만든



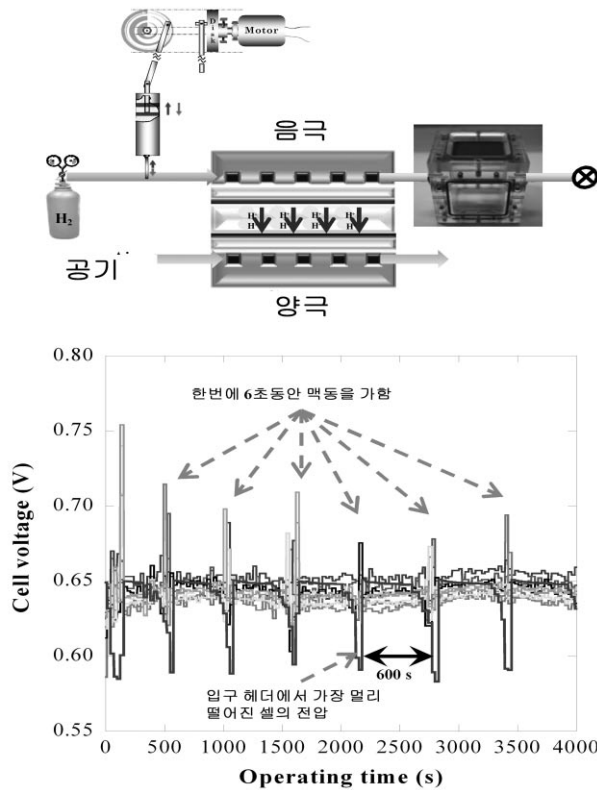
[그림 7] 주파수 변동에 퍼지 주기의 변화



[그림 8] 나피온 구조물

<표 1> 폐쇄 모드 운전, 나피온 구조물 및 주기적인 맥동을 가하는 운전방법에서 전류 밀도에 따른 연료 이용률

전류밀도 (Acm <sup>-2</sup> )	맥동 사이의 간격 (s)	모터 전력 (W)	단위셀 평균 전압 (V)	모터구동을 위한 수소 소모량 (LPM)	스택구동을 위한 수소 소모량 (LPM)	연료 이용효율 (%)
0.6	3100	0.0148	0.734	0.0015	1.1235	99.06
1.0	950	0.0482	0.688	0.0052	1.8725	99.23
1.4	600	0.0761	0.640	0.0088	2.6215	99.31
1.8	480	0.0948	0.588	0.0121	3.3705	99.37



[그림 9] 폐쇄 모드 운전, 나피온 구조물 및 주기적인 맥동을 가하는 운전 시 시간에 따른 전압의 거동

후, 이를 연료전지의 후단에 연결하였다. 이 경우 단위셀에서는 나피온 구조물 만을 가지고 5일 동안 단 한번도 폐지를 하지 않고 가동이 되는 것을 보았다. 따라서 수동적이라 나피온 구조물의 크기가 틀려질 수 있긴 하지만, 휴대용 연료전지에 폐쇄형 운전모드를 적용할 경우 이 방법은 가장 효율이 높은 운전 방법 중 하나가 될 수 있다. 하지만 10장 이상의 단위셀로 이루어진 연료전지 스택의 경우 폐쇄 모드 운전과 나피온 구조물을 이용할 경우 물은 잘 빠져나오지만 스택 입구의 헤더에서 균일한 수소의 공급이 이루어지지 않음을 알 수 있었다. 따라서 이를 해결하기 위해 폐쇄 모드 운전과 나피온 구조물, 그리고 맥동 유동을 모두 합친 운전 방법을 제시하였다. 이 경우 맥동 유동은 각 단위셀의 전압을 측정하면서 농도 분극 문

제를 겪기 시작할 때에만 주기적으로 가하였다. 그림 9는 이렇게 운전할 경우 연료전지 스택의 전압 거동을 보이고 있으며, 단 한번의 폐지 과정이 없이 운전이 가능함을 보여주었으며 평균 8~9 sccm의 수소의 크로스 오버를 제외한 모든 수소를 사용할 수 있어 99% 이상의 연료 효율을 얻을 수 있었다. 전류 밀도를 바꾸어 가며 실험을 하면서 각각의 연료의 이용효율을 표 1에 정리하였다. 이는 폐쇄 모드로 운전되는 연료전지의 새로운 운전 방법이며 향후 챔버의 크기에 관한 최적화가 이루어진다면 가장 효과적인 폐쇄 모드 운전 방법 중 하나가 될 수 있으며, 작은 스케일의 휴대용 연료전지 뿐만 아니라 수송용 연료전지에도 적용할 수 있는 효율적인 운전 방법 중 하나가 될 수 있음을 알아냈다. (㉞)