

PEM 연료전지의 운전장치 (BOP)

PEM 연료전지는 고분자막 전해질로 사용하는 것으로 간단한 구조, 저온구동 등의 장점으로 최근 연료전지 자동차, 휴대용 전원, 분산발전 등 다양한 용도로 활용하기 위해 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 본 고에서는 PEM 연료전지 시스템에 있어서 연료전지 스택을 구동하는 데 필수적인 운전장치(BOP: balance of plant)에 대해 소개하고자 한다. 특히 많은 요소기기로 구성된 운전장치 중에서 연료전지 성능에 큰 영향을 미치는 수소공급장치, 공기공급장치, 가습기, 전기장치에 대해 기술하고자 한다.

김 서 영

한국과학기술연구원 열유동제어연구센터(seoykim@kist.re.kr)

이 대 영

한국과학기술연구원 열유동제어연구센터(idy@kist.re.kr)

수소공급장치

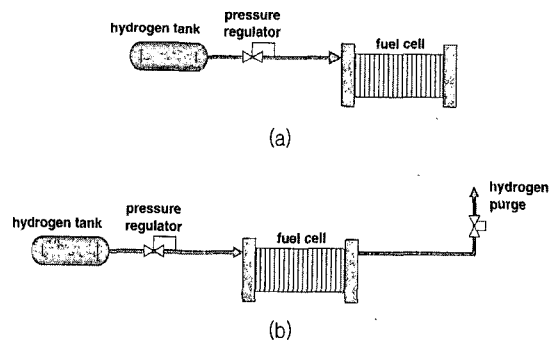
수소저장

PEM 연료전지의 연료는 수소이며 일반적으로 고압용기에 가스형태로 저장된다. 고압용기는 200~450 기압의 고압유지를 위하여 대개 강철용기로 제작되는데 무게로 인하여 사용에 많은 제약이 있다. 최근 알루미늄 용기에 복합재료를 결합하여 중량비 5%의 수소를 저장할 수 있는 강화 경량 압력용기의 개발이 보고 되었다. 수소를 고밀도로 저장하기 위한 다른 방법으로는 수소를 액체형태로 보관하는 것이다. 액체수소 저장용기를 개발한 독일 BMW의 보고에 의하면 중량비 14.2%의 수소를 보관할 수 있다. 그러나 대기압에서 액체수소의 온도는 20.3 K의 극저온으로 수소의 기화를 막기 위해 고비용의 첨단 단열기술이 요구된다. 또 다른 수소 저장방법으로는 수소저장합금(metal hydride)를 사용하여 수소를 수소저장합금의 금속격자 구조 내에 가두는 것으로 고압 수소가스 저장방식보다 저장밀도가 높다. 그러나 수소저장합금 자체가 너무 무거워 수소를 중량비 1~1.4%밖에 저장할 수 없는 문제점을 안고 있다. 최근 고효율 수소저장합금에 대한 일부 연구보고가 있으나 고온에서만 사용할 수 있는 것으로 저온에서 작동하는 PEM 연료전지용으로는 부적합하다. 다른 화학적 수소저장방법으로는 히드라진(hydrazine), 암모니아, 메탄올, 에탄올, 리튬 하

이드라이드 (lithium hydride), 소듐 하이드라이드 (sodium hydride), 소듐 보로하이드라이드 (sodium borohydride), 리튬 보로하이드라이드 (lithium borohydride), 칼슘 하이드라이드(calcium hydride) 등을 사용하는 것이 있다. 액체형태이고 저장효율이 높아 유리한 점이 있으나 일부는 독성과 부식성 등의 문제를 안고 있다.

수소공급

일반적으로 사용되는 고압저장용기로부터 수소를 연료전지 스택에 공급하는 가장 간단한 방법은 그림 1-a와 같은 dead-end mode를 사용하는 것이다. 이 경우에는 공급압력조절을 위한 압력조절기만

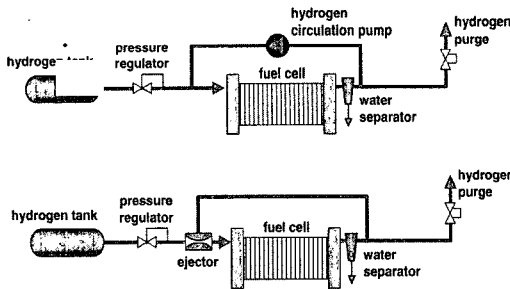


[그림 1] 수소공급 방식

설치하면 구성이 완료된다. 그러나 오랜 기간 dead-end mode로 운전하기 위해서는 순수 수소만이 사용되어야 하고 일단 불순물이 연료전지내로 유입되면 배출되지 않고 축적된다. 또한 전기영동(electro-osmosis)보다 역확산(back diffusion)이 큰 경우 캐소드(cathode)에서 넘어온 물이 축적되는 문제점도 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 그림 1(b)과 같이 일정기간 운전 후 수소를 퍼징(purging)하는 방법이 사용되기도 한다.

그러나 안전도 및 연료의 효율성 측면에서 과급된 수소는 재사용하는 것이 일반적이다. 그림 2과 같이 사용되지 않은 수소는 배출장치(ejector)나 펌프를 이용하여 수소공급관 입구로 재순환된다. 이 때 축적된 물은 기액분리기에서 배출된다.

또한 전기영동에 기인하는 고분자막의 건조현상(dry-out)을 막기 위해 수소는 연료전지에 공급되기 전에 충분히 가습되어야 하므로 이를 위해 그림 3과 같이 가습기가 연료전지 스택의 수소공급관 입구에 장착될 수 있다.



[그림 2] 페루프 수소공급장치

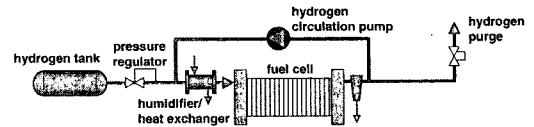
공기공급장치

일반적으로 PEM 연료전지의 전기화학반응에 필요한 산소는 대기로부터 공급받는다. 그러나 대기 중의 산소는 체적비로 20.95%를 차지하며, 이러한 낮은 체적비로 인해 산소탱크를 통한 순수한 산소공급에 비해 연료전지의 셀전위가 약 50 mV 감소하고 연료전지 구동에 무관한 질소를 수송하기 위해 상당한 반송전력을 소모하여 시스템의 효율을 감소시키는 문제가 있다. 따라서 고효율 공기공급장치의 개발이 필수적이다.

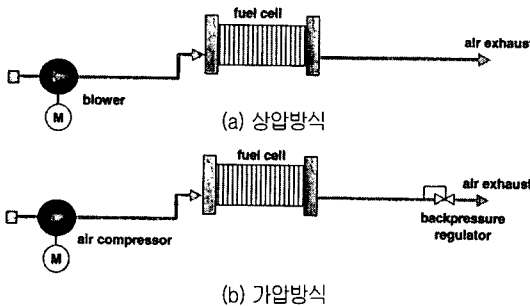
Active 공급장치

상압시스템의 경우 공기는 팬이나 블로워에 의해 공급되며, 가압시스템의 경우 압축기에 의해 공급된다. 상압시스템의 경우에 연료전지로부터 전기화학반응 후에 배출되는 공기는 대기로 바로 방출되며, 가압시스템은 후단에 압력조절기(pressure regulator)가 있어 압력을 유지시킨다(그림 4).

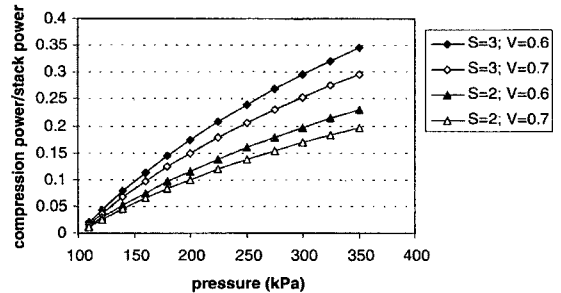
연료전지시스템을 그림 4(b)와 같이 가압상태로 구동시키고자 하는 이유는 일반적으로 출력을 높이고자 함이다. 그러나 그림 5에서 볼 수 있듯이 1.5



[그림 3] 가습기 장착 페루프 수소공급장치



[그림 4] 가공기공급장치



[그림 5] 압축기 소비전력비



가압 이상의 가압상태에서 압축기는 연료전지 출력의 상당량을 소비하게 된다. 이때 소비율은 압축기의 효율과 화학량비, 셀전압 등에 의해 결정된다. 그러므로 가압운전이 총 출력을 높이는 데 큰 효과가 없는 경우도 많으며, 오히려 실링, 중량 등의 문제가 있어 적용에 장애가 되기도 한다.

가압방식의 연료전지시스템에서 배출공기는 고온이며, 연료전지 입구보다는 낮으나 여전히 가압상태에 있다. 따라서 이러한 에너지를 이용하여 팽창기나 터빈을 구동시켜 압축기의 소비동력을 일부 보상할 수도 있다(그림 6).

Passive 공급장치

저출력의 연료전지시스템에는 일반적으로 passive 방식의 공기공급장치가 사용되기도 한다. 팬, 블로워나 압축기를 사용하지 않고 농도구배에 의한 확산 및 자연대류를 통해 산소를 공급한다. 자연대류 공기공급방식의 연료전지시스템에서 얻을 수 있는 최대 전류밀도는 약 0.1~0.15 A/cm²으로 낮은 편이다. 전류밀도는 active 공급방식(약 0.5 A/cm²)에 비해 매우 낮으나 구조가 간단하고 콤팩트한 소형 연료전지시스템의 구현에 유리하다.

가습기

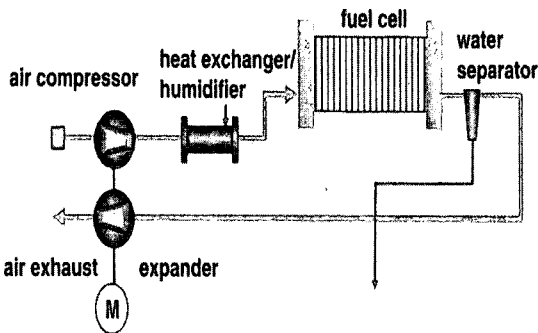
공급되는 공기가 건조하여 연료전지 스택의 입구 영역에서 전기화학반응에 의해 생성되는 물의 양보다 많은 물이 건조한 공기로 흡수되지 않도록 공급공기는 충분히 가습이 이루어져야 한다. 원칙적으로

공기 및 수소측 모두 가습이 이루어져야 하는데, 특히 전기영동(electroosmotic drag)에 의해 수소측(anode)에서 건조현상(dry-out)이 발생하지 않도록 해야 한다. 현재 사용중인 가습방법은 다음과 같다.

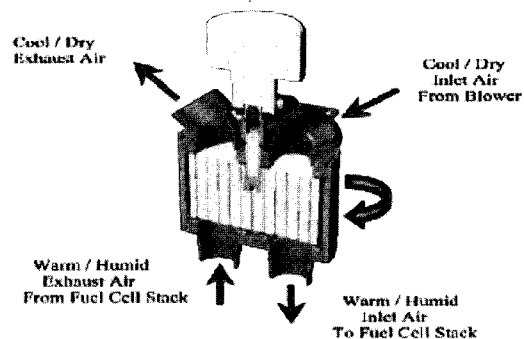
- 1) 가스버블링
- 2) 직접분무
- 3) 흡수층을 통한 수분교환
- 4) 투과층을 통한 수분교환

가스버블링은 공급유량이 작은 실험실 규모의 장치에서 사용이 가능하다. 따뜻한 물에 잠긴 다공성 관 내로 공기가 유입되어 기포가 형성되면서 가습이 되는 것으로 물의 온도를 제어하여 가습량을 조절할 수 있다. 그러나 온도 및 가습량 조절이 용이하지 않다. 직접분무방식은 장치도 간단하고 온도, 공기유량, 요구습도에 따른 수량 조절도 쉽다. 그러나 물방울이 충분히 작게 분무되어야 하고 증발을 위해서는 가열이 필요하다. 가압방식의 경우는 압축기의 열이 사용될 수 있으며, 상압방식의 경우는 스택자체의 반응열이 사용될 수 있다.

흡수층이나 투과층을 통한 수분 및 열교환은 스택에서 발생한 열과 물을 재사용하는 측면에서 유리하다. 흡수층을 통한 습도 및 열교환 방식은 대개 그림 7에 나타낸 바와 같이 엔탈피로터를 사용하는 것으로, 배기가스에서 흡착된 수증기가 공급공기 측으로 이동하여 재생되는 방식이다. 이 방식은 별도의 큰 에너지 소모 없이 가습효과를 얻을 수 있는 장점이 있으나, 구조가 복잡하며 배기가스와 공급공기 사이의 누설억제가 쉽지 않다는 어려움이 있다. 투과층을 이용한 방식에서는 금속, 세라믹, 그래파이트 같

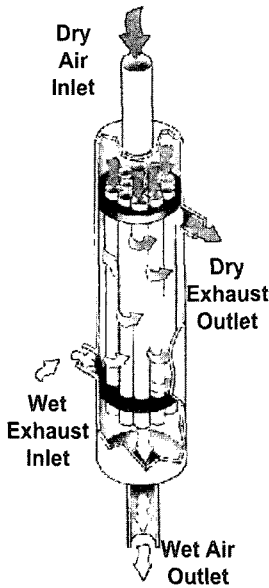


[그림 6] 팽창기 장착 가압 공기공급장치



[그림 7] 회전로터형 가습기

은 다공성판 또는 Nafion과 같은 투과성막이 사용된다. 그림 8에 현재 PEM 연료전지 가습방식 중 주류를 이루고 있는 막 가습기(membrane humidifier)의 개념도를 나타내었다. 이러한 방식은 가습을 위한 추가적인 에너지를 필요로 하지 않지만, 충분한 가습을 위해서는 막의 표면적이 매우 넓어야 하기 때문에 대부분 투과성 막으로 직경 1 mm 정도의 가는 관을



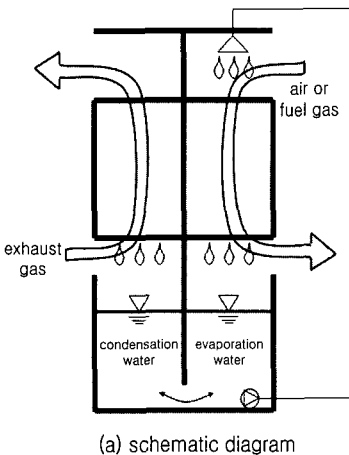
[그림 8] 페루프 수소공급장치 막 가습기

제작하고, 관다발을 묶어 원통-관형 열물질 교환기로 제작한다. 막 자체가 매우 고가이며 가공이 어렵기 때문에 대량생산에 부적합하여 가습기의 가격이 상승하는 요인이 되며, 복잡한 구조로 인하여 피 가습 가스의 유동에 심한 압력 손실이 발생하게 된다.

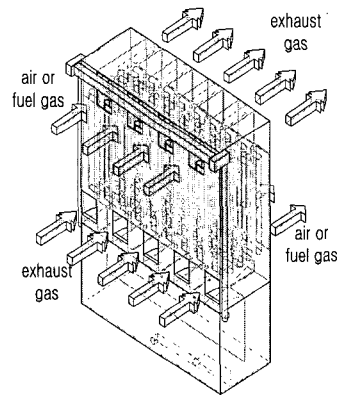
최근에는 직접분무식과 투과층을 통한 수분교환 방법의 장점을 취합하고 문제점을 보완한 증발식 가습기가 소개되었다. 이 방식의 가습기는 그림 9에 나타낸 바와 같이 응축채널과 증발채널이 쌍을 이루는 구조로 되어 있다. 배기가스가 응축채널을 통과 하면서 증발채널을 통과하는 흡입공기에 열을 빼앗겨, 수증기의 응축이 일어나며, 이 응축수는 증발채널에 분무되어 흡입공기를 가습한다. 분무된 응축수는 응축채널로부터의 열공급에 의하여 증발이 촉진되므로 높은 습도로의 가습이 가능하다. 이 방식은 투과층을 통한 수분교환 방법과 기본적으로 유사하지만, 대량생산이 매우 용이하며, 가격이 저렴한 금속재료를 적용할 수 있는 장점이 있다.

전기장치

전기장치는 연료전지 스택에서 생성된 전기를 부하(load)에게 공급하는 장치이다. 또한 전기장치는 연료전지시스템의 운전에 필수적인 펌프, 팬, 블로워, 솔레노이드 밸브 등에 전기를 공급할 수 있어야 한다.



(a) schematic diagram



(b) evaporative humidifier

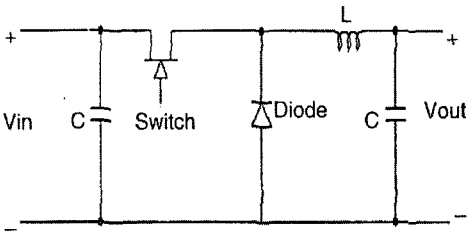
[그림 9] 증발식 가습기 개념도



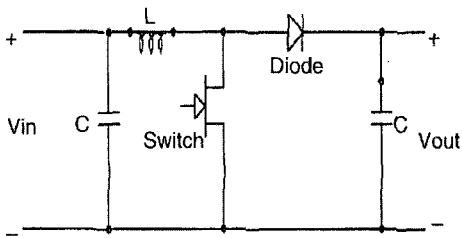
DC/DC컨버터, DC/AC인버터

연료전지는 직렬로 연결된 연료전지 스택 수에 의해 결정된 전압으로 직류 (DC)를 생성한다. 물론 연료전지 전압은 전류에 따라 변한다. 연료전지의 개회로(open circuit) 전압은 셀당 1 V 정도이다. 일반적으로 정격출력에서 전압은 0.6~0.7 V 정도이다. 그러므로 연료전지 스택에서 전압변동은 0.6:1.0 ~ 0.7:1.0 V이며, 대부분의 전기부하는 이러한 전압변동을 견디지 못한다. 따라서 전압유지가 전기장치의 핵심기능의 하나이다. 부하의 요구전압에 따라 전기장치는 셀전압을 감소(buck converter)시키거나 증가(boost converter)시킬 수 있어야 한다. 부하전압이 셀전압 범위에 있는 경우에는 buck-boost converter가 사용된다. 전압유지는 다음과 같은 스위칭이나 chopping 회로를 사용하여 구현된다.

- 1) 사이리스터 (thyristors), GTO (gate-turn-off) 사이리스터
- 2) 1 kW 이하의 저전압 시스템에서는 MOSFET (metal oxide semiconductor field effect transistor)
- 3) 50 A 이상의 고전류 시스템에서는 IGBT (insulated gate bipolar transistor)



(a) buck converter



(b) boost converter

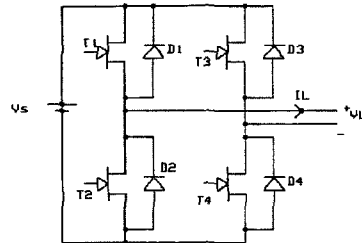
[그림 10] DC컨버터

다이오드, 캐패시터, 인덕터를 같이 사용하여 그림 10과 같은 회로를 구성하면 전자스위치는 요구되는 전압을 제공할 수 있다.

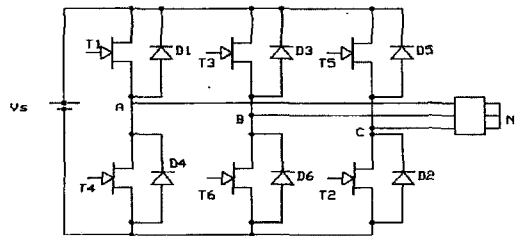
교류(AC)가 필요한 경우, 전기장치는 그림 11과 같은 DC/AC 인버터회로를 사용하여 교류를 공급할 수 있다. AC인버터의 교류는 직각파형이므로 일반적으로 pulse-width modulation(PWM)이나 tolerance-bend pulse method를 사용하여 사인파형의 교류를 생성한다. DC/AC 인버터의 효율은 70~90% 정도이다.

배터리

연료전지시스템은 일반적으로 시동이나 피크출력 대비를 위해 그림 12, 13과 같이 배터리나 커패시터(ultra-capacitor)를 사용한다. 시동 배터리는 연료전지를 구동시키는 데 필요한 주요기기의 전압 요구조건과 맞아야 하며 부하의 변동에 대처할 수 있어야 한다. 연료전지 스택 자체만으로도 수소공급량을 조절하여 부하변동에 대처가 가능하나 압축기, 펌프 등의 기계장치가 전기적 부하변동에 신속히 대처하기는 어렵기 때문에 배터리가 필수적이다.

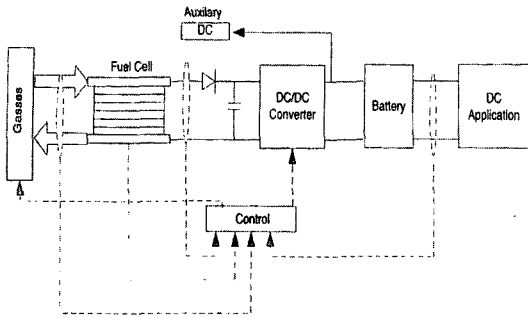


(a) 단상

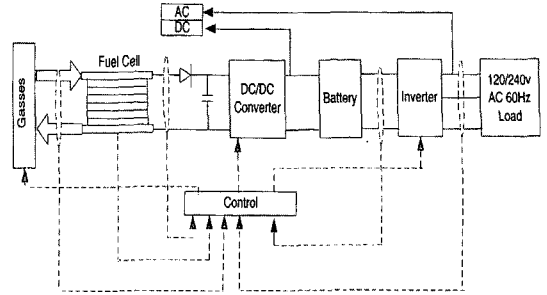


(b) 3상

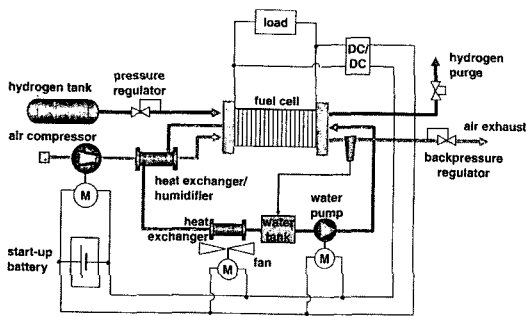
[그림 11] DC/AC 인버터



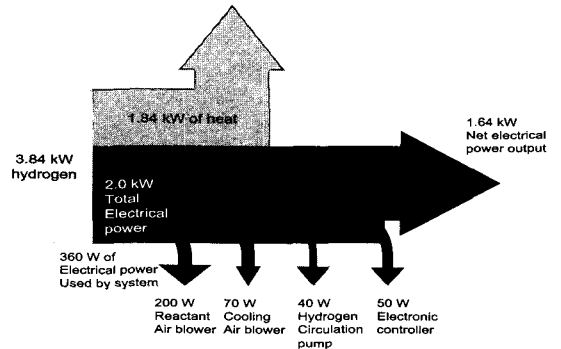
[그림 12] DC 출력장치



[그림 13] AC 출력장치



[그림 14] PEM 연료전지 시스템 완성사례



[그림 15] 2.0 kW급 PEM 연료전지의 Sankey diagram

지금까지 언급한 여러 운전장치와 연료전지 스택을 결합하여 시스템으로 구현한 사례를 그림 14에 도시하였다. 주요 운전장치와 더불어 물 및 열관리를 위한 열교환기, 기액분리기, 펌프 및 냉각기 등이 통합되어 시스템의 안정적 운영을 도모하고 있다. 그림 15는 2.0 kW급 PEM 연료전지시스템에서 운전장치가 소비하는 전력비를 보여주고 있다. 총 2.0 kW의 전기출력에서 약 18%를 블로워, 펌프, 전기장치 등의 운전장치가 소비하고 있어 운전장치의 고효율화와 연료전지 시스템 최적 통합기술의 중요성을 지적하고 있는 좋은 예이다.

결 언

지금까지 간략하게 PEM 연료전지의 구동에 필수적인 운전장치(BOP)의 주요 요소기기에 대해서 살펴보았다. 운전장치는 스택과 함께 연료전지 시스템의 성능을 결정하는 가장 중요한 요소로 고효율 요소기기의 연구개발과 함께 최적의 요소기기 통합기술이 실현되어야 함을 알 수 있다. 특히 연료전지의 운전장치는 기계 및 전기, 제어분야의 연구개발 인력이 크게 기여할 수 있는 분야로 향후 설비인의 많은 관심과 참여가 기대된다. ㉞