

연료전지 운전 장치 개발 현황 및 소개

민경덕*, 김한상*, 강상규*, 하태훈*, 김보경*

1. 서론

점차 강화되고 있는 자동차 배기가스 규제에 대응하고 점차 고갈되어 가는 화석 연료를 대체하기 위해서 세계적으로 고효율 친환경 자동차의 개발에 박차를 가하고 있다. 이러한 노력의 일환으로 선진국 등에서는 저/무공해 자동차의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 그러나 기존의 내연기관으로는 점점 엄격화되고 있는 세계 각국의 배기 가스 규제 및 CO₂ 저감 목표를 달성하기에는 여러 문제점들이 있다. 이러한 이유로 자동차 선진국은 연료 전지 자동차의 개발 및 상용화를 위해 적극적인 노력을 기울이고 있다. 환경 친화성과 연료 효율성을 겸비한 연료전지 자동차는 현재 실용화에 근접한 것으로 평가되어 상용화를 위해서 일부 선진국에서 대규모 투자를 하고 있다. 연료전지는 화학에너지가 전기에너지로 직접 변화되어 연료가 계속 외부에서 공급되고 반응 생성물은 외부로 제거되는 에너지 변환 장치이다. 연료전지를 자동차의 동력원으로 사용하기 위해서는 이러한 전기·화학 반응을 원활하게 이루어지도록 하는 주변 장치들의 개발도 필요하다. 차량에 들어가는 연료 전지 시스템은 반응이 일어나는 연료 전지 외에 반응물을 공급해주는 수소 공급계, 공기 공급계, 반응으로 생성된 물을 관리하는 물 관리계 및 배기계, 스택 및 각 시스템의 성능 유지를 위한 열 관리계, 반응 후 잉여 수소를 관리하는 수소 재순환 펌프 등으로 구성되어 있다. 각 시스템들이 연료전지 운전 장치를 구성하고 있는 모습은 그림 1에서 보여지고 있다. 전원 발생 장치인 연료전지 스택을 제외한 이러한 시스템 구동계를 Balance of Plant (BOP)라고 하기도 한다. 이러한 BOP 장치의 개발 및 최적화 연구는 스택의 효율적인 전기 화학적

반응을 위하여 절대적으로 필요하다. 본 연구에서는 BOP 시스템의 연구, 문제점 및 BOP 시스템의 기술 개발 동향에 대해서 알아보고 본 연구실의 BOP 연구에 대해서 간략하게 소개하고자 한다.

2. 본론

2.1 BOP 시스템 연구

2.1.1 BOP 전체 시스템

BOP 시스템은 연료전지 운전 장치라고 할 수 있다. 즉, 연료전지 스택을 최적의 상태로 운전되도록 하며, 동시에 발생된 전력을 효과적으로 사용하기 위한 역할을 수행한다. 그림 1에서 부각되어있는 장치들이 연료 전지 자동차가 원활하게 운전되기 위한 BOP장치이다. BOP는 크게 기습 시스템과 공기 공급계, 열 관리 냉각 시스템, 수소 재순환 장치로 구성된다. 각 구성 시스템들의 작동 원리 및 그 역할에 대해서 살펴보기로 한다.

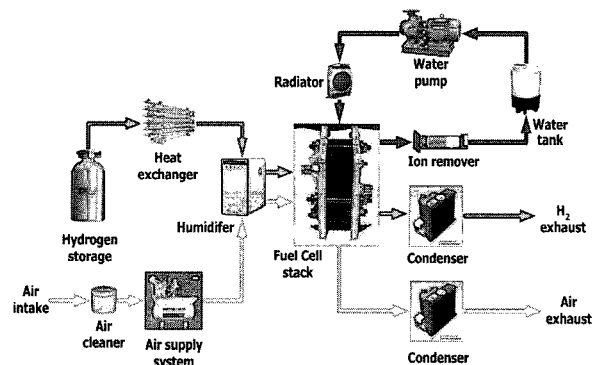


그림 1. 연료전지 BOP 시스템

* 서울대학교 기계항공공학부 동력공학연구소
Email : kadmin@snu.ac.kr

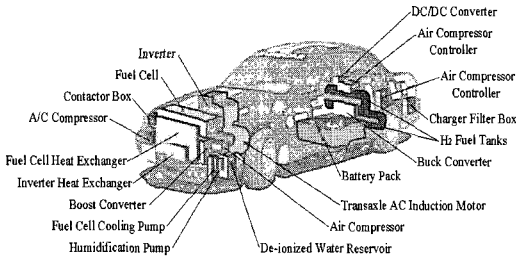


그림 2. 실제 연료 전지 자동차 BOP장치

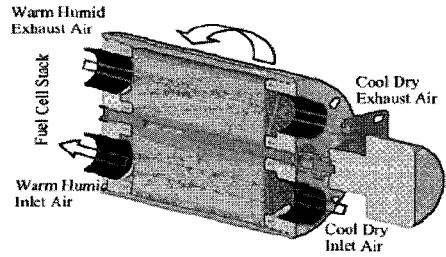


그림 3. 작동 원리

2.1.1.1 가습 시스템

가습 시스템은 전해질 막의 이온 전도성을 유지하기 위하여 스택에 공급되는 수소와 공기에 적절한 수분을 공급하는 역할을 한다. 전해질 막의 이온 전도성은 가습량에 더욱 크게 영향을 받는다. 그러므로, 출력 밀도가 클수록 더욱 큰 영향을 받기 때문에 높은 출력에서 가습량은 연료 전지 시스템의 물 균형(water balance)을 위해 매우 중요하다. 그림 3은 건조하던 공기가 가습계를 통하여 습도가 올라가고 있는 모습을 보여 주고 있다. 즉, 가습 시스템의 일반적인 원리를 잘 나타내 주고 있다. 그림 4는 실제 출시된 Humidicore사의 가습시스템이다. 가습 방법은 가습이 이루어지는 장소에 따라 스택 자체에서 가습이 완료되는 내부 가습법과 스택의 외부에 가습기를 설치하는 외부 가습법으로 나뉘어진다. 또한 가습 방법에 따라 막 가습법, 초음파 가습법, 노즐 분사 방법, 가열 증발법, 엔탈피휠법 등으로 구분되기도 한다.

2.1.1.2 공기 공급 시스템

공기 공급 시스템이란 수소와의 전기화학 반응에 필

요한 공기를 공급하는 시스템이다. 스택의 운전 압력과 공급 가능한 공기량을 결정하여 연료전지의 성능과 운전조건 등을 결정한다. 연료전지의 성능은 운전 압력이 증가함에 따라 향상되는 반면, 동시에 공기공급계에서의 동력 손실도 증가하므로 두 가지를 감안하여 연료 전지 시스템 전체의 효율 향상을 위한 최적화 설계를 할 필요가 있다. 공기 공급계로는 터보 컴프레서(turbo compressor), 슈퍼 차저(super charger), 터보 블로어(turbo blower) 등이 이용되는데, 연료전지로 유입되는 공기의 양과 이때 요구되는 압력 조건에 따라 이 조건들을 만족시키는 공기공급기가 필요하다. 그림 5와 그림 6은 상용화된 가압형과 상압형 공기공급계이다.

2.1.1.3 열 관리 냉각 시스템

연료전지 차량 운전시 발생하는 열을 제거하는 시스템으로, 스택을 비롯한 각 제어기들이 일정 온도에서 작동하도록 만들어주는 시스템이다. 열 교환기의 종류에는 기체-기체 열 교환기, 기체-액체 열 교환기, 콘덴서, 라디에이터 등이 있다. 보통 2.5 kW이하의 저용량 스택에서는 공냉식 냉각 시스템을 사용하지만,

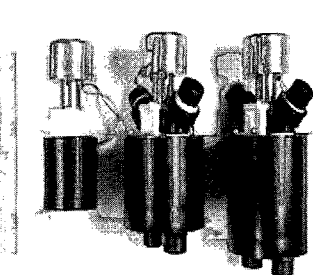


그림 4. Humidicore 사 제품

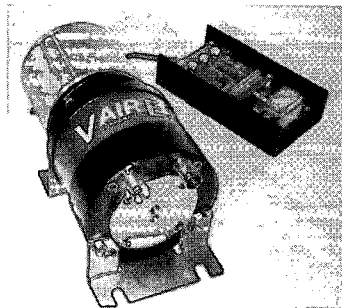


그림 5. Vairex, Compressor

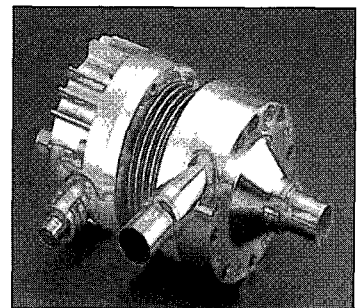


그림 6. Blower

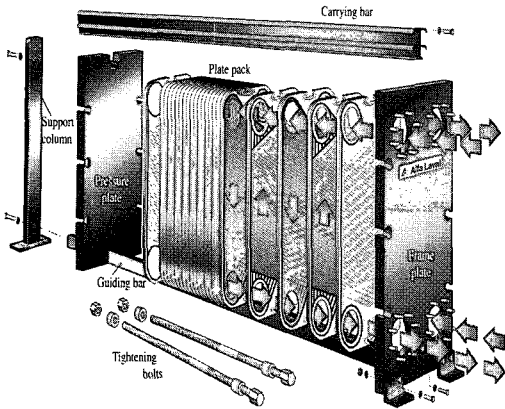


그림 7. Plate Heat Exchanger의 작동 원리

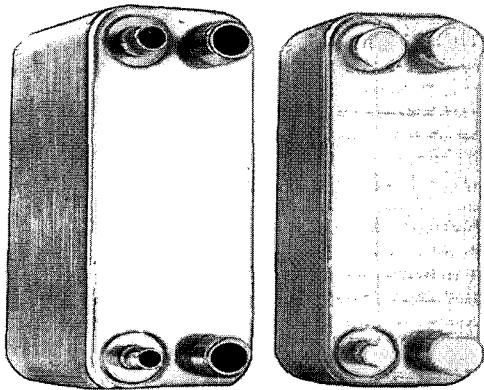


그림 8. Plate Heat Exchanger

2.5 kW이상의 스택에서는 수냉식의 냉각 시스템을 사용한다. 그림 7은 라디에이터로서 열 관리 냉각 시스템을 대표한다.

2.1.1.4 수소 재순환 시스템

수소 재순환 시스템은 스택에서 사용하고 남은 수소를 다시 재순환시켜 연료 전지 시스템의 효율을 향상시키기 위한 장치이다.

2.2 BOP 기술 개발 동향

2.2.1 연료전지 운전 장치 기술 개발 현황

자동차용 연료전지 운전 장치 (BOP)의 개발은 연료전지 전문회사 및 자동차 회사를 중심으로 이루어지

고 있다. 미국의 UTCFC 및 캐나다의 Ballard가 대표적인 연료전지 전문회사이다. 현재 미국의 UTCFC는 상압형 연료 전지 시스템을 중점적으로 개발하고 있으며, 이 회사는 스택 내의 물 회수를 원활하게 하여 스택 성능을 향상시킬 수 있는 열 및 물 관리 시스템, blower를 이용한 공기 공급 시스템 및 수소 재순환 시스템을 개발했다. 이와 반대로 캐나다의 Ballard는 고압에서 작동하는 연료전지 시스템을 개발 했다. 연료 전지 공급 공기 및 수소의 공급량을 차량의 운전 상태에 맞추어 제어함으로써 최적의 효율을 내게 하는 시스템 운전 제어 개발을 하고 있다. 자동차 회사로는 일본의 Toyota와 Honda, Nissan 그리고 미국의 GM, Ford와 독일의 Daimler-Chrysler와 같은 자동차 회사들이 회사의 기술력에 따라 다양한 연료전지 운전 장치 시스템 개발을 추진하고 있다.

2.2.2 연료전지 운전 장치 부품 개발 현황

2.2.2.1 공기 공급 시스템 개발

현재 산업용으로 개발된 공기공급기는 운전영역, 효율, 무게, 소음 및 응답성 등에서 차량용으로 적용하기에 부적합하여 운전압력에 맞게 개발되고 있다.

2.2.2.2 열관리 냉각 시스템 개발

운전온도와 대기온도의 작은 온도 차에 의한 방열문제를 해결하기 위한 고효율 라디에이터가 개발 중이다. 즉, 연료전지 시스템의 작동 온도는 내연기관 보다 낮기 때문에, 냉각수와 대기와의 온도 차가 작아서 라디에이터를 통한 열 교환 능력이 작아지게 된다. 이것이 연료전지 자동차의 냉각 시스템이 내연기관차에 비해 커지는 이유로서 차량의 장착성을 고려하여 대기와의 열 교환 능력을 극대화할 수 있는 소형의 라디에이터의 설계가 요구된다.

표 1. 회사별 공기 공급계 개발

UTCFC	원심형 터보블로어
TIAX	하이브리드 터보스크롤 압축기/팽창기 모듈 개발
Honeywell	터보압축기/팽창기 모듈 개발

2.2.2.3 수소 재순환 시스템 개발

이젝터(ejector)나 송풍기(blower)가 연구되고 있는 실정이다. 이젝터는 고압으로 공급된 기체가 분사 노즐에서 고속으로 분사하고, 고속으로 분사되는 기체에 의하여 낮은 압력이 형성된 다른 흡입실 주변부에 있던 기체들이 고속으로 분사된 기체 분류에 흡입되어, 고속으로 분사된 기체와 흡입 유체는 에너지 전달 및 혼합을 하고 초음속 유동의 혼합 기체는 출구에서 배출압력까지 압축되어 외부로 배출되는 원리를 이용한 것이다. 그림 9은 이젝터의 기체 흐름을 간단히 보여 준다. 수소 재순환 시스템에서 아직까지 해결되지 못한 문제점으로는 최적의 내식성 소재 개발과 안정성 확보(sealing 등) 및 BLDC 모터 개발 등이다.

2.3 본 연구실의 BOP 시스템 연구 현황

2.3.1 BOP 시뮬레이션

본 연구실에서는 Matlab/Simulink를 이용하여, 0-D Simulation으로 전체 BOP 시스템을 구성한 바 있다. 0-D Simulation을 통하여 BOP 시스템의 최적화를 구축하였으며, 연료전지의 기본적인 성능을

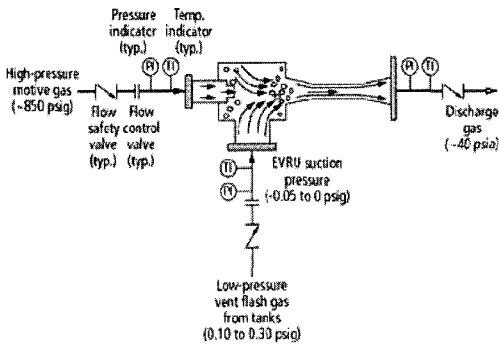


그림 9. Ejector

표 2. 제조사별 수소 재순환계 적용 현황

회사	수소 재순환 시스템 형태
Ballard (DCX)	Ejector Type
UTCFC	Blower Type
Honda	Ejector Type
Nissan	Ejector, Blower 혼합형

확인하였다. 또한 공기 공급 장치를 변경하여 각 시스템의 효율과 출력을 비교하는 연구를 하였다. 즉, blower를 사용하는 상압형 시스템과 compressor를 사용하는 가압형 시스템의 비교가 이루어진 바 있다. 그러나 차량 연료 전지는 부하 조건의 변화에 따라 안정적으로 구동해야 한다. 그리하여 이전의 정상 상태로 구성하였던 BOP 시스템을 비정상 상태로 점차 바꾸어 나가고 있다. 최근 고분자 전해질형 연료 전지를 제어 가능하도록 Matlab/Simulink를 이용하여 quasi 3-d dynamic simulation으로 구성하였으며, 이로 인하여 CFD를 사용하지 않고서도 간단하게 셀의 국부 지역의 전류 밀도, 상대 습도, 기체 몰 농도, 온도 등을 측정할 수 있게 되었다. 또한 열 관리 냉각 시스템을 dynamic simulation으로 구성하였다. 그리하여, 부하조건에 따른 스택 냉각수의 입·출구 온도를 파악할 수 있었으며, 스택의 온도를 일정하게 유지시켜 주기 위한 제어 시스템에 대한 토대를 마련하기도 하였다.

2.3.2 실험

본 연구실에서는 단위 연료전지 관련 기초 실험을 주로 진행하였다. 우선 본 연구실에서는 그림 10에서 보이는 1 kW의 작은 unit cell station과 5 kW의 차량용대면적 unit cell station을 보유하고 있다. 1 kW의 unit cell에서는 연료 전지의 기본적인 특성 등을 검증하는 실험을 행하였다. 또한 연료전지 시스템에서 중요한 가장 중요한 것 중의 한 가지라고 할 수 있는 물 관리를 위하여 가시화 셀 및 가스 크로마토그래프를 이용하여 연료전지 내의 flooding 현상을 관찰하였다. Gas Chromatograph는 측정 대상의 검출 시간과 열전도도 차이를 이용하여 성분과 몰분율을 정성적으로 파악할 수 있는 정밀한 실험 장치로서 물의 생성을 정성적으로 측정할 수 있었다. 더 나아가 flooding을 효과적으로 제어할 수 있는 유로 설계나 균일한 전기 화학 반응을 일어날 수 있게 하는 유로 디자인을 위한 배경 지식을 마련해 주었다. 특히 셀 내부의 유로의 단면 형상 및 유로의 전체적인 타입의 다양화를 통하여 각 조건들이 cell 성능에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 조사도 수행할 수 있었다. 더 나아가 유로의 최적화 설계에 대하여 고찰할 수 있었다. 또한 BOP장치 중 가습 관리 시스템을 버블링 타입에서 막 가습기로 교체하여 실험해봄으로써 유형별 가습기의 성능 비교 실험을 수행하였다.

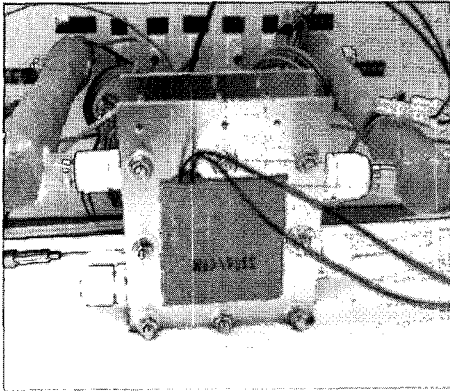


그림 10. PEM Unit Cell Station

3. 결론

연료전지 차량은 화석 연료의 한정성과 대기 오염이라는 문제를 해결해 줄 수 있는 가장 가능성이 높은 대안으로 급부상하고 있다. 하지만 아직 가격 문제 및 인프라 구축 또한 부하 조건 변화에 따른 스택 성능 안정화 등 해결해야 할 문제점들이 산적해 있는 실정이다. 물론 현재까지 활발히 진행되고 있는 연료전지 스택 자체의 연구도 중요하지만, 스택의 성능을 원활하게 유지하기 위한 연료전지 운전 장치의 개발 및 문제점 해결도 시급한 문제라 할 수 있다. 아직까지 국내의 연료전지 운전 장치 관련 부품 기술이 열악하기 때문에 전량 수입에 의존하고 있고, 앞으로 연료전지 차량

의 시장이 확대될 것을 감안하면 연료전지 운전 장치 관련 기술개발이 절실히 요구되는 상황이다. 현재 연료전지 운전 장치 개발은 각종 연료 전지 차량 개발을 통하여 기술적인 문제점들이 계속적으로 검증되고 있으나, 내구성 및 비용 절감 등 기술 개발의 장애물들이 많이 산재해 있는 실정이다. 상업화를 위해서는 이러한 기술적 장애를 극복하기 위한 꾸준한 연구 및 개발이 필요하다. 더불어 이를 위해서는 선진국에 비해 연구 인력 및 연구비 측면에서 열세에 있는 상황이기 때문에 국가적으로 지속적인 관심과 집중 투자를 하여야 할 것이다. 더불어 상용화시기에 맞추어 연료전지 차량이 국민들에게 각광을 받을 수 있도록 인프라 구축 및 제도적인 대안을 마련하여야 할 것이다.

참고문헌

- (1) 권문식 외 4명, 2003, “자동차 신기술 동향 및 대응과제.”
- (2) 김민수 외 9명, 2004, “승용차용 80kW급 고분자 연료전지 운전 장치 개발에 관한 산업분석.”
- (3) 김한상 외 5명, 2005, “다변수 최적화 기법을 이용한 자동차용 고분자 전해질형 연료전지 시스템 모델링에 관한 연구.”
- (4) 조원석, 2002, “현대 자동차 연료전지 워크숍 2002 발표자료집 중 연료 전지 자동차 기술.”