

수소연료전지자동차용 시스템 운전장치 개발

박용선*, 권혁률*, 김성균*, 김치명*, 임태원*

1. 서 론

자동차 산업은 지난 100년의 역사를 통해 인류의 비약적인 발전에 끊임없이 이바지해 왔다. 자동차 산업의 급속한 발달은 수많은 일자리를 창출하였고, 타 산업에의 무한한 영향력으로 국가 발전에 필수불가결한 산업으로 자리 잡아 왔다. 이에 대부분의 선진국들은 자동차 산업에 국가적 역량을 집중하였고, 수많은 자본과 인력을 투입하여 자국의 자동차 산업을 방어하려 노력하는 모습을 보여 왔다. 그러나 최근 엄청나게 증가한 자동차 대수로 인해, 환경오염에 대한 관심이 날로 증가하고 있으며, 석유 자원의 고갈 또한 인류가 당면한 큰 문제점으로 인식되고 있어 이러한 환경오염 방지 및 에너지 고갈에 대한 대체 에너지 개발 등의 이유로 지금 전세계 선진 자동차회사에서는 신 에너지 사용으로 화석에너지를 대체할 수 있는 미래형자동차 즉, 수소연료전지 자동차 개발에 심혈을 기울이고 있다. 도요타는 1992년부터 연료전지 사업에 착수하여 1996년에 첫 연료전지 차량을 선보였으며 2002년부터는 미국과 일본 내에 리스 판매를 시작하였다. 한편 1999년에 처음 연료전지 차량을 선보인 혼다는 2003년 최초로 영하 20도에서 시동 가능한 연료전지 차량을 개발하였다. GM은 연료전지 스택 및 운전장치 부품들의 레이아웃을 새롭게 설계하여 2005년 연료전지 전용 차량인 Sequel을 발표하였다. 이렇듯 해외 선진 자동차 업계에서는 궁극적인 친환경 무공해 미래형 자동차로서 각광받고 있는 수소연료전지자동차의 기술 개발에 과감히 투자하고 있다. 국내에서도 수소연료전지 자동차는 1998년 국가 G7 사업 및 차세대자동차 개발사업을 바탕으로 개발되기 시작되었다.

현대자동차와 한국과학기술원은 1999년과 2001년에 각각 10 kW급과 25 kW급 스택을 개발하여 스포티지 연료전지 하이브리드차와 썬타페 연료전지 하

이브리드차를 개발하였으며 이후로 현대-기아자동차는 국내 우수 연구소와의 요소기술개발을 통한 독자기술력을 확보함과 아울러 미국 IFC사 (현 UTC Power)와의 공동개발을 수행하여 2000년 11월 75 kW급 스택을 장착한 썬타페 연료전지차를 개발하였으며, 이후 저온 시동성이 개선된 투싼 연료전지자동차를 2004년 개발하였으며 2005년에는 스포티지 연료전지자동차를 개발하였다. 뿐만 아니라 현대자동차는 정부지원 과제를 통해 수소연료전지 버스를 개발하기 시작했으며 2006년 국내 최초로 연료전지 버스 개발을 발표할 예정이다.

2. 본 론

2.1. 연료전지 시스템 운전장치 개요

내연기관에 연료 및 공기 공급, 냉각, 배기를 위한 장치로 구성된 엔진 운전 장치가 있듯이, 연료전지 발전 시스템에도 같은 기능을 하는 연료전지 운전 장치가 있으며, 열 및 물질 수지 개념을 중요시하는 화학 공정에서는 이를 Balance of Plant(BOP)라 한다. 시스템 운전 장치인 BOP에는 크게 공기공급계, 열 및 물 관리계, 수소공급계로 나눌 수 있다. 공기공급계 (APS : Air Process System)는 연료전지 스택에 수소와 반응을 할 공기 (산소)를 공급하는 시스템으로 에어클리너, 공기공급기 (Air Blower 또는 Air Compressor) 등으로 구성되어 있다. 열 및 물 관리계 (TMS : Thermal Management System)는 전체 시스템에서 필요로 하는 물 균형을 유지하는 기능이 있으며, 또한 반응 시스템은 열을 발생하게 되는데 이를 적절한 온도로 유지하는 기능을 한다. 구성부품으로는 라디에이터, 물펌프, 이온제거기, 물탱크 등이 있다. 수소공급계 (FPS : Fuel Process System)는 스택에 수소를 공급하는 시스템으로 여기에는 수소 탱크, 압력 조절기, 수소재순환기 등

* 현대자동차 환경기술연구소 연료전지시스템발팀

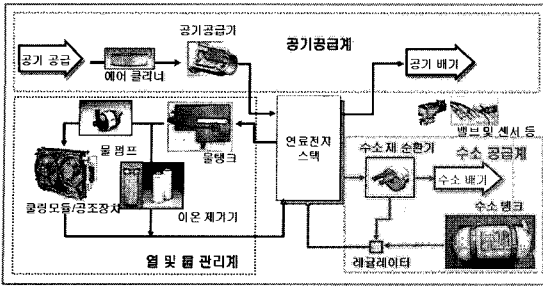


그림 1. 연료전지 시스템 구성도

으로 구성되어 있다. 이밖에 APS, TMS, FPS 공통으로 구성되는 부품은 온도 및 압력 등을 측정하는 각종 센서와 콘트롤 밸브, 배관류 등이 있다. 연료전지 시스템도 스택을 운전하기 위해서는 위에 언급된 시스템 운전 장치인 APS, TMS, FPS의 장치가 있어야 한다.

2.2. 물 및 열 관리계

연료전지 스택은 기본 구조는 아래 그림 2와 같다. 연료극에 수소를 공급하고 공기극에 공기를 공급하면 수소 이온이 전해질을 통과하여 이와 동시에 수소에서 분리된 전자는 전기 회로를 따라 외부 회로에서 일을 하고 공기극으로 돌아와서 공기중의 산소와 전해질을 넘어온 수소 이온과 만나면서 물을 발생한다. 이때 연료전지 스택에서 발생하는 물은 다음과 같이 표현된다.

$$\text{생성 물 (kg/sec)} = 9.34 \times 10^{-8} \times \text{스택출력/셀전압}$$

연료전지 스택은 운전 시에 생성되는 물의 양보다 공기극에서 배출되는 공기가 포함하는 수증기의 양이 많게 되면, 즉 물 균형이 이루어지지 않으면 스택의

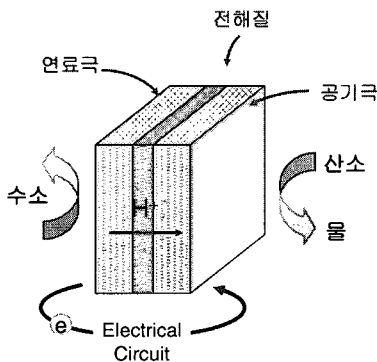


그림 2. 연료전지스택 기본 구조와 전류 반응

전해질 막은 건조하게되어 스택 성능을 저하시키게 되며, 이것이 반복되면 스택의 내구 수명을 단축시키게 된다. 따라서 연료전지 냉각 시스템은 스택을 적정 온도에서 운전되도록 설계되어야 한다. 스택 출력에 따라 발생하는 열은 아래와 같으므로

$$\text{발생열} = \text{스택출력} \times (1.25/\text{셀 전압} - 1) [\text{watt}]$$

이러한 발생열이 냉각시스템을 통해 냉각되어야 하며, 이때 적절히 조절된 냉각수에 의해 스택이 요구하는 운전온도에서 작동되도록 하는 것이 중요하다.

일반 내연기관의 엔진 온도보다 스택의 운전 온도는 낮기 때문에 대기의 온도가 찬 경우에는 문제가 되지 않지만 여름의 경우 대기가 섭씨 40도에 이르게 되면 냉각수와 대기의 온도차가 크지 않아 열 교환을 위한 충분한 온도 차이를 확보하기 어렵다. 같은 성능의 라디에이터를 사용한다면 라디에이터 면적이 기존 내연기관의 그것보다 4배 정도의 표면적을 가져야 한다. 이러한 어려움을 극복하기 위해 고 효율, 고 성능 라디에이터의 개발을 포함하여 라디에이터의 면적을 높이는 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 내연기관의 라디에이터보다 냉각성능이 개선된 연료전지용 라디에이터와 팬, 팬 모터를 개발하여 연료전지차량이 대기온도 40도 이상의 경우에서도 운전이 가능하도록 하였다.

하지만 근본적으로 연료전지 스택의 열 방출 문제를 해결하기 위해서는 약 섭씨 100도에서 작동할 수 있는 고온 작동 연료전지의 개발이 필수적이라 하겠다.

이러한 고효율 라디에이터 개발 뿐 만 아니라 냉각수를 냉각 loop내에서 적절한 유량으로 회전시키기 위한 전동식 물 펌프도 개발하였다. 본 연구에서 개발한 전동식 물 펌프의 성능은 다음 그림 3과 같으며 선진사에서 개발한 전동식 물 펌프보다 성능이 우수하였다.

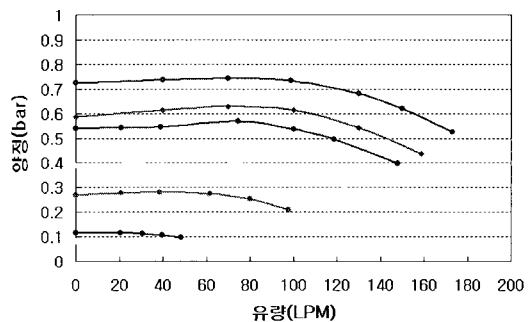


그림 3. 연료전지용 전동식 물펌프 성능

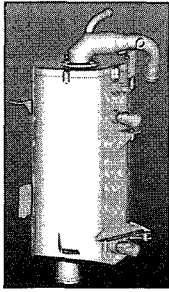


그림 4. 이온 및 기포 제거 기능을 지는 물 탱크

이 밖에 열 및 물 관리계를 구성하는 부품으로는 이온 및 기포 제거 기능을 지는 물 탱크, 전자식 써모스탯, 압력 및 온도센서 등이 있다. 그림 4는 이온 및 기포 제거 기능을 지는 물 탱크로 연료전지용 냉각수에 적합한 소재로 만들었다.

2.3. 공기공급계

공기공급계 구성 부품 중 가장 개발 난이도가 높은 부품은 공기블로워이다. 국내 자동차용 연료전지 스택의 운전 압력 조건이 상압에 가까우므로 이번에 개발된 공기블로워의 사양은 아래 표와 같다.

그림 5는 표 1의 사양으로 개발된 제품의 형상이며, 그림 6은 본 개발의 성능 곡선이다.

본 연구에서 개발된 터보 블로워는 토출압 1.3bar_abs

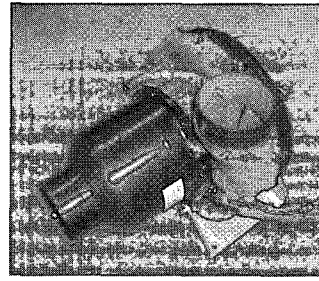


그림 5. 개발된 터보 블로워

조건에서 공기 5,000 SLPM (95 g/sec) 공급되어 80 kW급 연료전지시스템 공기공급용으로 설계되었음을 확인하였으며, Design Point에서 600 hr 연속운전 통과하였으며 현재는 각 환경 조건, 운전 조건별로 평가를 진행하고 있다. 향후에는 고온에서 운전되는 연료전지 시스템을 위해서 PR을 증가 시킬필요가 있으며, NVH 및 내구성을 보완하기 위해서 에어 포일 베어링을 적용한 공기공급기를 개발할 예정이다.

공기공급계에서는 공기공급 라인에서 압력 저하가 적은 시스템이 적용되어야 공기블로워의 손실도 적어지고 또한 스택이 요구하는 유량을 공급할 수 있다. 따라서 공기공급라인을 통과하는 공기의 압력 저하가 분석하기 위해서 그림 7과 같이 해석을 통해 차량에 적용되는 공기공급계에서의 압력 분포를 알아보았다. Total 압력강하는 1.7 Kpa로 나타났다.

이밖에 공기공급계의 구성 부품으로는 화학 물질을 제거하는 공기 필터, 공기 유량계, 압력 센서등이 있다.

표 1. 터보 블로워 상세 사양

항목	조건
Design point	95 g/sec @ PR1.3
Overall efficiency	62% @ Design point
Max. peak supply power	4500 Watts
Inlet air temp.	< 45 °C
Motor winding temp.	< 100 °C
Max blower pressure	32 kPa
Max flow rate	6,000 SLPM
Input speed signal	0~10 VDC
Controller mode	Close loop speed Controll

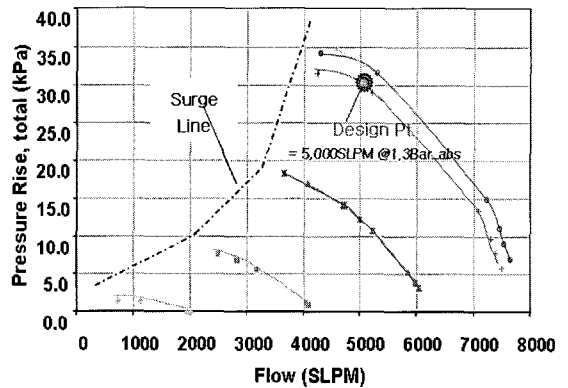


그림 6. 터보 블로워의 성능 곡선

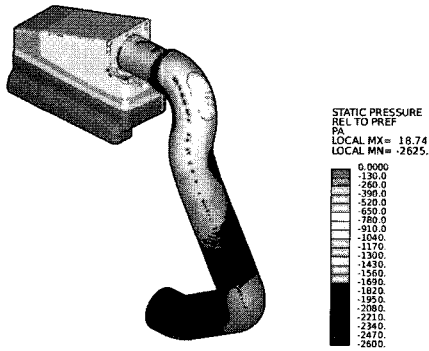


그림 7. ISO View (Static Pressure)

2.3. 수소공급계

어떤 반응에서도 그렇듯이 연료 전지 스택에서도 수소나 공기가 적당한 양이 공급된다고 하더라도 모든 수소가 다 반응하지는 못한다. 이렇게 스택에 공급되는 수소가 100% 반응하지 않고 배기가스에 상당 부분이 섞여 있을 때 그냥 배출해 버린다면 폭발의 위험이 있을 뿐만 아니라 비효율적인 운용이 될 수 있으므로 연료의 효율적인 측면에서 연료 재활용은 꼭 필요하다. 수소 측의 배출구가 스택의 수소 입구와 연결되어 연료의 재순환이 이루어지도록 사이클을 구성해야 할

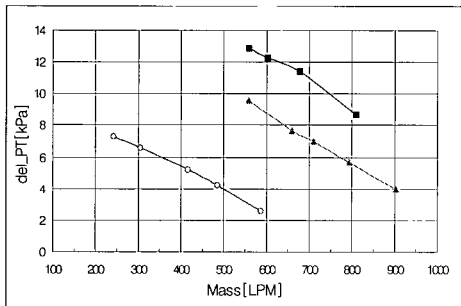
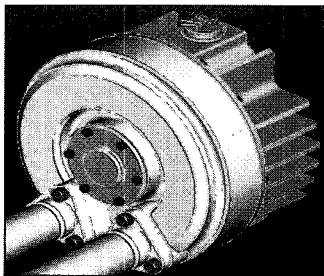


그림 8. 수소 재생형 블로워의 성능곡선

것이다. 따라서, 이러한 수소 재순환 장치는 스택을 통과하면서 미 반응된 수소를 재순환시켜 수소이용률을 증대시키고, 이를 통해 차량의 연비향상을 꾀하는데 그 목적이 있다. 이를 위해 이젝터 (ejector)나 재생형 블로어 (regenerative blower)가 그 주요한 수단으로 연구되고 있다. 발라드 (ballard)와 혼다 (honda)에서는 이젝터를, UTCFC에서는 재생형 블로어를, 닛산 (nissan)에서는 그 두 가지를 혼합하는 형태의 수소 재순환 시스템을 개발하고 있다.

국내에선 재생형 블로워 타입과 이젝터 타입을 모두 개발 중에 있으며, 그림 8은 국내에서 개발된 수소 재생형 블로워의 형상 및 성능을 보여준다.

이밖에 수소공급계의 구성 부품으로는 압력 조절기, 솔레노이드 밸브, 수소감지센서 등이 있다.

3. 결론

연료전지 차량은 일본의 도요타와 혼다, 니산, 미국의 지엠, 님러 크라이슬러, 포드를 비롯하여 전 세계적으로 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 부시 (Bush) 행정부는 2002년 1월 미래형 자동차로서 고연비 내연기관 자동차의 개발을 포기하고 연료전지 자동차의 개발에 집중할 것임을 선언한 바 있고, 일본의 경우 이미 2002년 12월 2일 도요타와 혼다가 각각 연료전지 자동차 한 대씩을 정부에 임대 형식으로 전달하고 고이즈미 총리가 직접 그 자동차들을 시승함으로써 미국과 유럽을 뿌리치고 연료전지 자동차를 판매하기 시작한 첫 번째 나라가 되었다.

국내에서는 1998년 국가 G7 사업 및 차세대자동차 개발사업을 바탕으로 연료전지 자동차가 개발되기 시작되었다. G7 사업을 통하여 현대자동차와 한국과학기술원은 1999년과 2001년에 각각 10 kW급과 25 kW급 스택을 개발하여 스포티지 연료전지 하이브



그림 9. 스포티지 연료전지자동차

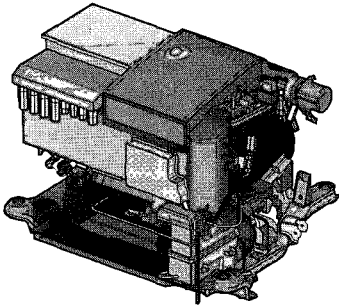


그림 10. 투싼연료전지자동차 스택 및 시스템 운전장치

리드차와 싘타페 연료전지 하이브리드차를 개발하였으며 2000년 11월에는 75 kW급 스택을 장착한 싘타페 연료전지차, 2004년에는 저온 시동성이 개선된 투싼 연료전지자동차, 2005년에는 스포티지 연료전지자동차가 개발되었다.

한국 자동차 산업의 지속적 경쟁력을 유지하고 한 단계 보다 발전하기 위해서는 범지구적으로 진행되고 있는 수소 경제로의 에너지 패러다임 변화 및 이에 따른 시장 환경의 변화에 능동적으로 대응해야 하며, 이를 위해서는 연료전지 스택, 운전장치 및 연료전지 차량의 기술 개발이 집중적으로 이루어져야 할 것이다.

후 기

본 연구는 산업자원부 주관 “성장동력 신기술개발

사업”의 과제인 “80kW급 승용차용 고분자 연료전지 운전장치 개발” 연구의 일환으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

- (1) James Larminie and Andrew Dicks, “Fuel Cell Systems Explained,” Second Edition, John Wiley & Sons, LTD.
- (2) Matthew H. Fronk, et al. “PEM Fuel Cell System Solutions for Transportation,” SAE 2000-0-0373.
- (3) David J. Friedman, et al. “Balancing Stack, Air Supply, and Water/Thermal Management Demands for an Indirect Methanol PEM Fuel Cell System,” SAE 2001-01-0535.
- (4) Alfred P. Meyer et al. “Progress in the Development of PEM Fuel Cell Engines For Transfotation,” SAE-2001-01-0540.
- (5) 차일남 편찬, “연료전지 자동차,” 도서출판 아진.