

## 연료전지자동차용 수소재순환블로어 개발

홍창욱\*, 김영수\*

### 1. 서론

연료전지자동차는 전기자동차 수준의 환경 친화성 및 정속성, 하이브리드 전기자동차를 능가하는 연료 효율, 가솔린 자동차 수준의 연료 공급 편의성을 겸비한 운송 수단이다. 수소를 연료로 사용하므로 zero emission이며, 연료 생산부터 차량 운행까지의 CO<sub>2</sub> 발생량을 따진다면, 전기 자동차는 물론 현재 제안된 모든 대체 연료 자동차보다 더 적게 발생한다고 알려져 있으며, 연료전지 차량이 실용화될 경우 자동차로 인한 환경 오염과 에너지 소비 문제를 크게 완화할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 차량에 탑재될 정도의 가격, 성능, 안전성 측면에서도 에너지 효율 제고를 통한 지구 온난화 방지, 대기 환경 보호, 대체 연료 사용 등 여러 분야에서 이용 가능한 기술로 평가되어 전 세계 메이저 자동차 회사에서 총력을 기울여 개발을 진행하고 있다.

연료전지시스템은 동력 (전기)을 발생시키는 발전 모듈 (스택)과 이 발전 모듈을 최적의 상태로 운전하

기위한 운전장치시스템 (BOP)로 구성된다.

연료전지 운전장치는 연료인 수소를 공급하는 수소 공급시스템, 산화제인 공기를 공급하는 공기공급시스템, 연료전지시스템에서 발생하는 열과 물을 관리하는 열물관리시스템으로 구성된다. 연료전지 운전 장치 시스템 개발은 국내외 모든 자동차 회사들이 독자적인 개발을 추진하고 있는 것으로 알려지고 있다. 국내에서는 연료전지 부품/소재 산업 분야에서 연구개발차원의 시제품 개발을 위한 소규모의 시장이 형성되고 있으나, 기술개발에 필요한 주요 부품 및 소재는 대부분 수입에 의존하고 있다.

수소공급시스템은 작게는 저압 레귤레이터 또는 가변유량/압력 제어밸브와 수소재순환시스템, 시동 밸브, 퍼징 밸브와 각종 센서류 및 공급 배관류 등으로 구성된 시스템을 말하며, 크게는 고압수소탱크와 고압 솔레노이드밸브, 고압 레귤레이터로 구성된 수소탱크모듈을 포함한 시스템을 말한다.

연료전지 스택에서 공기와 수소를 공급할 때 반응 셀이 적층되어 있는 스택 구조에서 100%의 화학 반응이 이루어지지 않고, 각 셀을 지나는 수소의 유속, 분포 등을 적절히 유지하고, 매니폴드의 유동 저항 등을 고려하여 전지반응에 필요한 양보다 더 많은 수소를 공급해야 한다. 그러므로 스택의 성능확보 및 수명증대를 위하여 스택에서 사용되고 남은 수소는 연료의 낭비를 막아 시스템의 효율을 높이기 위해 수소를 재

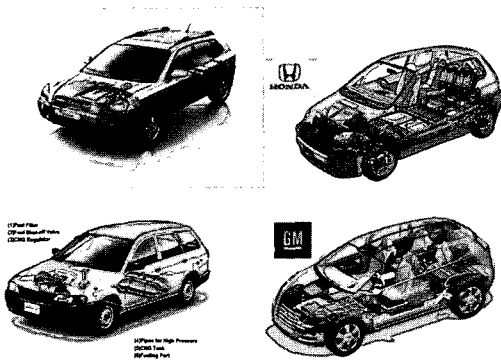


그림 1. 연료전지 자동차

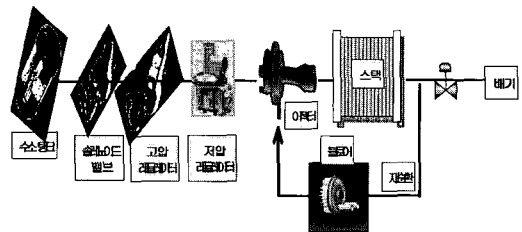
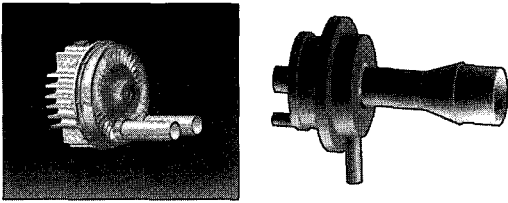


그림 2. 수소공급시스템

\* (주)로템 기술연구소  
Email : cwhong@rotem.co.kr



(a) 수소재순환블로어 (b) 수소재순환이젝터  
그림 3. 수소재순환장치

순환하여 스택 입구로 되돌려야 한다. 수소재순환 장치의 성능과 효율은 연료전지 시스템의 성능과 효율을 증가시키며, 따라서 스택의 크기를 감소시킬 수 있다. 따라서 수소공급시스템은 스택에서 미반응된 수소가 재순환되어 재사용되도록 설계하고 있으며, 이로부터 차량의 연비를 확보하고, 차량으로부터 배기되는 수소의 양을 줄여 대량의 수소 배기에 기인한 환경 영향을 최소화하고 있다. 따라서 수소재순환시스템은 연료전지 자동차의 연비를 결정하는 중요한 부품이다.

본 논문에서는 연료전지 자동차에 적용되는 수소재순환장치인 수소재순환블로어의 개발 동향 및 국산화 개발을 목표로 수행한 연구 내용을 기술하였다.

## 2. 본 문

### 2.1. 수소재순환시스템 개발 동향

수소 재순환에는 블로어 또는 이젝터가 연료전지 시스템의 운전특성에 맞게 적용되고 있으며, 재순환 이후 배기되는 소량의 수소 또한 1% 이하의 농도로 희석하여 배기되도록 설계되고 있다. 수소 재순환에는 연료전지 시스템의 운전특성에 따라 가압시스템인 경우 이젝터, 상압시스템인 경우는 블로어가 주로 사용되고 있다.

수소재순환블로어는 연료전시스템에서 생성되는 전

표 1. 회사별 수소재순환장치

회사명	수소재순환시스템
Ballard (DCX)	Ejector Type
UTCFC	Blower Type
Honda	Ejector Type
Nissan	Ejector, Blower 혼합형

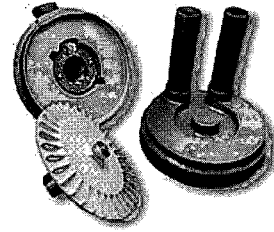


그림 4. 수소재순환블로어(PADT社, 美)

력을 이용하여 모터를 구동, 증압시키므로, 모터의 회전수를 변화시켜 연료전지 자동차의 운전 조건에 따른 탈설계점 성능을 확보할 수 있다는 장점을 가지고 있으며, 연료전지자동차의 개발 크기에 따라 scale 설계를 통해 신속한 개발에 대응할 수 있는 장점을 가진다. 그러나 진동, 소음, 내구성에 약하며 연료전지에서 발생하는 전력을 사용하여 전체적인 연료전지시스템의 효율을 감소시키며, 구조가 복잡하여 개발비 및 가격이 높다는 단점을 지닌다. 특히 저온 환경에서의 냉시동 성능에 절대적인 단점을 가지고 있어 현재 냉시동 성능을 향상시키는 방향으로의 블로어 개발이 이루어지고 있다.

현대자동차에서 사용하는 연료전지시스템의 경우, 상압하에서 운전되기 때문에 재생형 블로어를 수소재순환장치로 사용한 수소공급시스템을 개발하고 있다. 현재 해외 선진업체에서는 개발 사양과 관련 업체와의 협력 개발 형태에 따라 아래와 같이 블로어와 이젝터 형식으로 나누어 개발을 수행하고 있다.

수소재순환블로어 형식으로는 미국의 PADT社의 제품이 개발 상용화되고 있다.

수소재순환블로어로 적용 가능한 유사 제품이 미국의 H2System社에서도 개발이 완료되었으며, 저온(-20℃~40℃)의 외부 환경에서도 적용이 가능하며, 95℃의 최대 유체 작동온도에서도 사용가능하다.

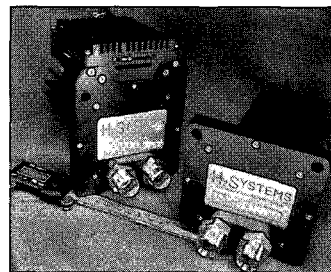


그림 5. 수소재순환블로어(H2System社, 美)

표 2. 개발 일정

단계	용도	연구 목표	연구 내용
1차 년도	상온시동	시제 개발	- 설계/제작/시험 기술 개발 - 성능/환경시험 인프라 구축
2차 년도	상온시동	국산화개발	- 성능 향상 기술 개발 - 내구성 향상 기술 개발 - 환경/신뢰성 시험/평가
3차 년도	냉시동	시제/ 국산화개발	- 냉시동 설계/제작/시험 기술 개발 - 양산 기술 개발

수소재순환블로어로 적용 가능한 유사 제품이 미국의 Ametek社에서도 개발이 되었다.

## 2.2 개발 일정 및 연구 내용

“80 kW급 연료전지자동차용 운전장치 개발”의 일환으로 2004. 12월부터 시작하여 3년간 개발을 수행할 예정이며, 개발 년차별 연구 목표와 내용은 표 2에 나타내었다.

연료전지시스템의 정적/동적 모사를 통해 표 3과 같이 수소재순환블로어의 개발 사양을 결정하였다.

수소재순환블로어는 작동유체의 특성상 수소에 의한 금속의 경화 및 부식을 방지해야 하며, 수소의 공기 내 함유량에 따라 모터의 스파크에 의한 폭발위험을 방지해야한다. 자동차에 사용되는 경우, 진동 및 열 특성에 높은 신뢰도를 유지해야 하며, 설계상 수명이 유지되어야 한다. 높은 효율을 갖도록 개발하여 성능 대비 부피와 무게를 최적화 하도록 개발 요구조건을 선정하였다.

표 3. 개발 사양

항 목	범 위
사용 유체	Hydrogen with nitrogen and vapor
유체 밀도	0.10~0.85kg/m <sup>3</sup>
압력 구배	0~15kPa
유량 범위	10~800 NL/min
파워(전원 소비)	최대 유량 환경에서 500W이하 (800NL/min, 75oC)
회전 RPM	16,000RPM
제품 수명	2,000 시간
효 율	25%이상(모터 효율 70%)

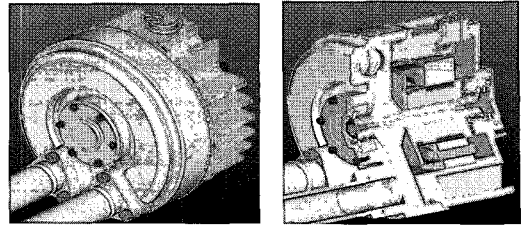


그림 6. 수소재순환블로어 구조

## 2.3 주요 연구 개발 내용

로터와 케이싱을 오가는 유체의 순환유동(circulatory flow)의 과정 동안 로터를 지나면서 일을 전달받아 원주방향으로 가속하게 되며 이후에 로터를 빠져나와 케이싱에 머무르는 구간에서 원주방향의 역압력 구배에 의해 감속하여 압력이 상승하는 구조의 재생형 블로어는 회전축 방향에 수직한 면을 기준으로 로터와 케이싱이 마주보는 구조이며, 축방향의 입, 출구 유로를 갖는다. 채널 단면은 원 형상을 따르며, 날개는 반원에 가깝다.

재생형 블로어는 구조적으로 단순하므로, 형상 설계는 블레이드의 형상, 수량, 유로 형상과 케이싱과 블레이드 사이의 유동 채널 형상, 축 이격거리, 반경 이격거리 그리고 압력을 상승시키는 역할을 하는 스트리퍼(stripper)의 폭과 축 이격거리를 임펠러 크기에 따라 유동해석을 통해 결정하였다.

또한 고속의 작동 회전수와 작동 온도 환경하에서 수소재순환블로어 임펠러의 열구조적 관점에서의 설계 검증 및 안전성 평가를 위하여 구조해석을 수행하였다. Von-Mises 응력은 75.4 MPa로 극한 강도를 기준으로 안전여유 (n=4.1)로 설계 허용 기준으로 안전여유 (n=1.5)를 만족하여 열구조적으로 안정적

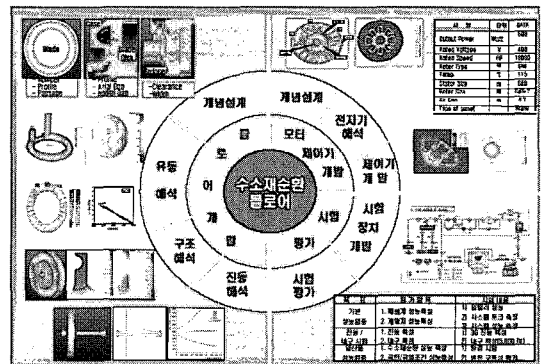


그림 7. 수소재순환블로어 설계/해석

일 것으로 판단되며, 축방향과 반경 방향으로 0.1 mm 이하의 변위를 가진다.

회전축 시스템의 설계에 있어 로터다이나믹 안정성 평가에 가장 기본이 되는 위험 속도를 예측 및 평가하였다. 로터다이나믹 해석 전용 프로그램인 RODAP를 사용하여 유한 요소 모델링에 의한 방법으로 해석을 수행하였다.

수소재순환블로어 회전축 시스템에 대한 임계속도 해석 결과는 작동 회전수(16,000 rpm)와 1차 임계속도(62,000 rpm)는 많은 차이를 보이고 있어 위험 속도에 대해서 안정적이라고 할 수 있다. 베어링 강성 변화에 따른 임계속도의 변화 그래프를 통해서 베어링 강성 계산에 따른 오차를 고려할 경우에도 수소재순환블로어 회전축 시스템은 일반적인 설계 요구 조건인 임계속도에 대해 20~30% 이상의 안전 여유를 만족함을 알 수 있었다.

Spark-free, 긴수명, 고효율의 방폭 BLDC 모터가 적용되었다. 설계 입력을 목표사양(500 W/16,000 rpm)보다 다소 크게 적용(750 W/16,000 rpm)하여 설계시 안전 여유를 많이 가져갔다. 그러므로 출력특성도 여유가 있으며 최고 회전수 및 열특성 또한 여유를 가질 수 있을 것으로 판단된다. 블로어 내부로 유입되는 수증기를 고려하여 rotor와 stator에 코팅을 하였고, 이를 고려하여 간극을 결정하였으며, 코팅재질에 대해서는 수소 취성등을 고려하여 에폭시 코팅을 적용하였다.

비선형 시스템인 모터의 전자기장 해석을 통해 공극 및 stator에서의 자속포화가 일어나는지를 검증하였다.

FEM 해석결과 단위 두께당 발생 토오크는 0.022 Nm 이며 여기에 적층두께 20 mm를 곱하면 토오크는  $0.022 \times 20 = 0.44 \text{ Nm}$  로 목표치 0.3 Nm를 만족하였다.

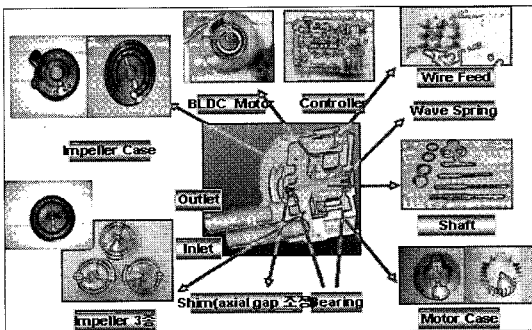


그림 8. 수소재순환블로어 시제품

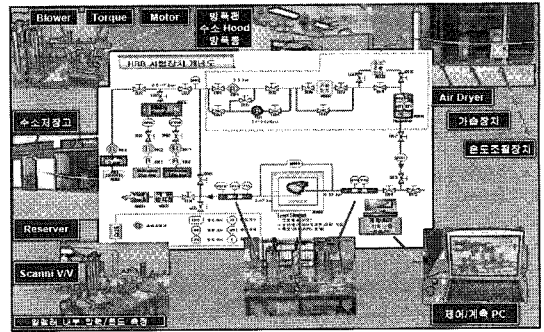


그림 9. 수소재순환블로어 성능시험장치

설계/해석을 통해 결정된 블로어의 형상을 그림 8에 나타내었다. 회전부에 완전 기밀을 유지하여 수소의 누설을 방지하였고, 블로어의 공력 성능을 결정하는 임펠러의 평균 직경은 100 mm에 30개의 블레이드로 이루어져 있다. 스트리퍼(stripper)와 임펠러 디스크 사이의 간격은 내부의 shim을 사용하여 조정 가능토록 회전체 끝단에 wave spring을 장착하였다. 향후 대량 양산 체제를 고려하여 알루미늄을 적용하였다. 특히 연료전지시스템에서 발생하는 전압에 사용 가능토록 고전압 BLDC 모터와 제어기가 개발 부착되어 있다.

그림 9와 같이 수소재순환블로어 성능/내구 시험장치가 개발되었다. 작동 매체가 폭발성이 큰 수소 가스를 사용하므로 방폭 기능을 포함한 부품과 수소 누설 시 배출 가능토록 설계되었다. 성능시험은 3단계로 나누어 실시되고 있으며, 1단계로 무가습, 대기압, 상온에서의 건조 공기를 사용하여 임펠러의 모사 공력성능과 진동 특성시험을 수행하며, 실제 작동 매체인 수증기가 포함된 수소 80%+질소 20%의 혼합물을 사용하여 실 공력성능과 진동 특성시험을 수행하였다. 2단계로 구동 모터와 제어기를 포함한 수소재순환블로어의 성능 특성시험을 수행하고, 마지막으로 내구성능을 파악하기위한 시스템 내구 특성 시험을 수행하였다.

2차년도에서는 1차년도에서 획득한 시험 결과를 활용하여 성능 향상을 위한 설계 기초 데이터로 활용하고, 임펠러 내부의 압력 특성을 스캐니 밸브를 이용하여 측정하여, 국산화 공력설계 프로그램 개발과 보정에 활용할 것이다. 또한 냉시동 특성을 파악하기 위해 운전 정지 후 수소재순환장치 본체를  $-20^{\circ}\text{C}$ 로 냉각 후 기동성능 시험을 할 예정이며 이를 위해서 가습장치, 온도조절장치 및 감압 장치와 각 항목별 측정센서를 설치하였다.

구축된 블로어 성능평가 시험장치는 향후 수소재순환이젝터 개발시에도 활용 가능토록 호환성 있게 개발되었다.

### 3. 결 론

연료전지시스템용 수소재순환블로어는 수소의 재활용 및 연료전지에서 생성된 전력을 사용하므로 블로어의 성능과 효율은 연료전지시스템의 전체 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 또한 차량에 사용되므로 수명과 신뢰성에 대한 입증과 무게와 정비성을 고려하여 개발되어야 한다.

(주)로템에서는 국내에서 최초로 연료전지시스템용 고효율 및 안전하고 신뢰성 있는 수소재순환블로어를 개발 중에 있다. 현재 상온시동용 수소재순환 블로어의 설계/제작/시험 기술 개발 및 성능 평가 및 신뢰성 평가 시험 인프라를 구축하였다.

향후 설계 최적화를 통해 고효율 및 내구성능을 확보한 시제 개발과 저온 환경에서 사용 가능한 수소재순환블로어를 개발할 예정이다.

### 후 기

본 연구는 산업자원부 주관 “미래형자동차개발사

업”의 과제인 “80 kW급 연료전지 자동차용 운전장치 개발” 연구의 일환으로 수행되고 있으며 관계자 여러분께 감사의 말씀을 드립니다.

### 참고문헌

- (1) 홍창욱, 2005, “연료전지자동차용 수소재순환블로어 개발,” 유체기계공업학회.
- (2) 심창열, 홍창욱, 김영수, 2005, “연료전지자동차용 수소재순환블로어 성능 특성 연구,” 자동차공학회.
- (3) 이찬, 성형진, 권장혁, 1991, “Study on the Performance Analysis and the Optimization of Regenerative Pump,” Transactions of the KSME B, Vol. 15, No. 2, pp 661~667.
- (4) Shim, C. Y. and Kang. S. H., 2003, “Through flow Analysis and Leakage Flow of a Regenerative Pump,” Transactions of the KSME B, Vol. 27, No. 8, pp. 1015~1022.