수송용 연료전지 스택의 개발 현황 및 향후 과제
A Review of Current Status and Challenging Issues of PEMFCs in Automotive Applications

김수환, 이종현, 이기춘, 임태원
현대자동차 연료전지개발팀

1. 서론

자동차 배기가스에 의한 환경오염 문제, 화석 연료 고갈에 대한 에너지 위기, 이산화탄소 총량 및 배기가스 규제 등에 대응하기 위한 대체 에너지 및 연료전지 기술 개발에 각국은 집중하고 있다. 차량 부문의 경우, 전기 자동차(BEV Battery Electric Vehicle) 개발이 1990년대 이후 집중되었으나, 일 충전 거리, 충전 시간 및 충전 인프라 등의 문제로 상용화가 지연되고 있으며, 대안으로 기존 Infra를 이용할 수 있는 하이브리드 차량이 각광을 받고 있다. 하이브리드 차량이 연비 향상 및 배기가스 저감의 이점을 가지고 있으나 여전히 유해 배출 가스 및 화석 연료 의존의 문제를 내재하고 있다. 그러나 연료전지는 내연기관에 비해 효율이 2~3배 우수하고 수소를 연료로 사용함에 따라 미래의 차량 동력원으로 가장 가능성이 큰 것으로 판단되고 있으며, 미래 수소사회의 주도권을 선점하기 위해서 각국에서는 수소 관련 기술 및 수소 연료전지개발에 집중하고 있는 실정이다.

현재 차량용으로 개발 적용 중인 고분자 연료전지의 개발 현황과 상품성 및 실용성을 겸비한 80kW급 스택 개발을 위해서 개발되어야 하는 과제에 대하여 기술하고, 또한 현대자동차의 개발 계획에 대하여 소개하고자 한다.

2. 개발 현황 및 개발 과제

PEMFC 연료전지차의 기술 수준은 차량 적용성이 가능한 기술로 시범운행등을 통하여 검증되었으며, 승용차의 경우 탑재성이 유리한 SUV(Sport Utility Vehicle)급, 상용의 경우 수소 Infra가 유리한 버스형태로 개발이 진행 중이다. 자동차 제조사별로 현재 각종 시범 운행 사업(미국CaFCP 및 DOE 시범 운행, 일본 연료전지실증시험)을 통한 시장 접근 방안을 탐색 중이며, 2010년 양산을 목표로 개발을 하고 있다(그림 1 참조)

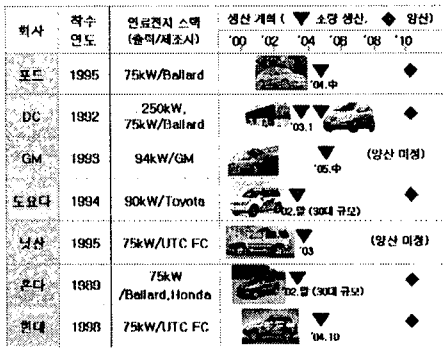


그림 2 연료전지차 개발 일정

국내의 경우 1999년 정부과제인 G7, "메탄올 개질형 연료전지 하이브리드 추진 차량 설계 기술 개발" 과제를 통하여 기술 개발이 시작되었으며, 국내 기술을 통한 연료전지 개발 이력을 표 1에 정리하였다.[1],[2],[3]

표 1 국내 연료전지 개발 이력(국내 기술)

년도	개발 내용	개발 주체
2000년	2kW급 PEMFC 스택 개발	KIST, HMC
2001년	10kW급 PEMFC 스택 및 시스템 개발 10kW급 메탄올 개질기 개발 10kW급 연료전지차량(스포티지/레조) 개발	KIST, KIER, HMC SK Daewoo, HMC
2002년	25kW급 PEMFC 스택 및 시스템 개발 25kW급 메탄올 개질기 개발	KIST, HMC SK
2003년	25kW급 연료전지차(Santa Fe FCHEV) 개발 35kW급 연료전지 스택 및 시스템 개발	HMC
2004년	35kW급 연료전지차(Santa Fe FCHEV) 개발	HMC

또한, 현대자동차는 10여년의 전기자동차 개발을 통하여 축적된 기술을 토대로 2000년 미국의 UTC FC사와 공동으로 싼타페 연료전지차를 개발하였다.[4] 또한 CaFCP(California Fuel Cell Partnership)의 캘리포니아주 세크라멘토 실도로 시범 운행 사업, 미 네바다주 고지(7334 ft) 및 저온 시험, 혹서(미 Death Valley Daylight Pass, 4,316ft)의 극한 환경 조건 시험을 통하여 연료전지차 설계 기술 및 know-how를 축적하였다. 또한 연료전지차량 경주에 참여하여 선진 업체 대비 동등이상의 성적을 거두었으며, 개발 이력을 그림 2에 나타내었다.

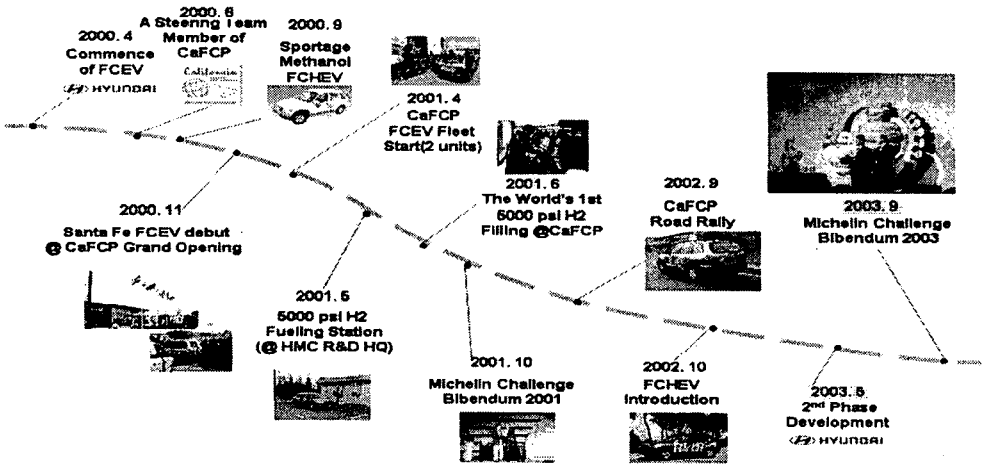


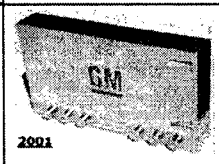
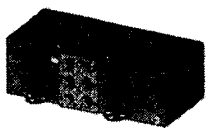
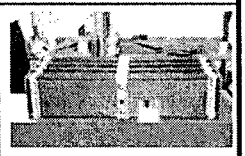
그림 3 현대자동차의 연료전지차 개발 이력

연료전지차 개발 및 평가를 통하여 얻은 교훈으로 연료전지차 실용화를 위해서는 아래 항목의 개선이 요구된다.

- 장수명(5,000시간 이상), 신뢰성
- 영하 시동성(-30℃)
- 내연기관과 동등 이상의 성능(가속성, 최고속도, 시동시간, NVH, 주행거리등)
- 차량 탑재성 및 유지 보수성 확보(차량 제한된 공간)
- 안전성(수소/전기)
- 가혹 환경 조건(2,500m 고지, 혹한(-30℃), 혹서(40℃) 등)에 견디는 강인성
- 연료전지 냉각 용이성 확보(차량 Radiator 크기 제한)
- 가격 경쟁력

연료전지차 실용화를 위해서는 신 재료, 요소 부품 기술, 시스템 기술, 그리고 생산 및 품질 기술 등의 종합적인 개발이 필요하다. 특히 연료전지 스택은 핵심 기술로서 선진업체에 비하여 현재 기술 수준이 떨어진 상태로 집중적인 개발이 필요한 분야이다.(표 2 참조) 또한 국내의 경우 용량 측면에서 35kW급에서 80kW급으로 용량을 증대하는 기술 개발이 요구된다.

표 2 스택 성능 비교

업체 / 항목	GM	Ballard	HMC
외관			
출력	102kW	85kW	35kW
출력밀도	1.75kW/L	1.13 kW/L	0.7kW/L
운전압력	1.5 bara	1.5~2.8 bara	1.1 bara
작동 온도	80℃	80℃	70℃
셀수	640	440	240
작동전압	N/A	250~480V	144~240V
가습기 여부	N/A	외부 막가습기	외부 막가습기

향후 상품성 및 실용성을 겸비한 80kW급 스택 개발을 하기 위해서 현 문제점, 해결 과제 및 관련 기술을 그림3에 정리하였다.

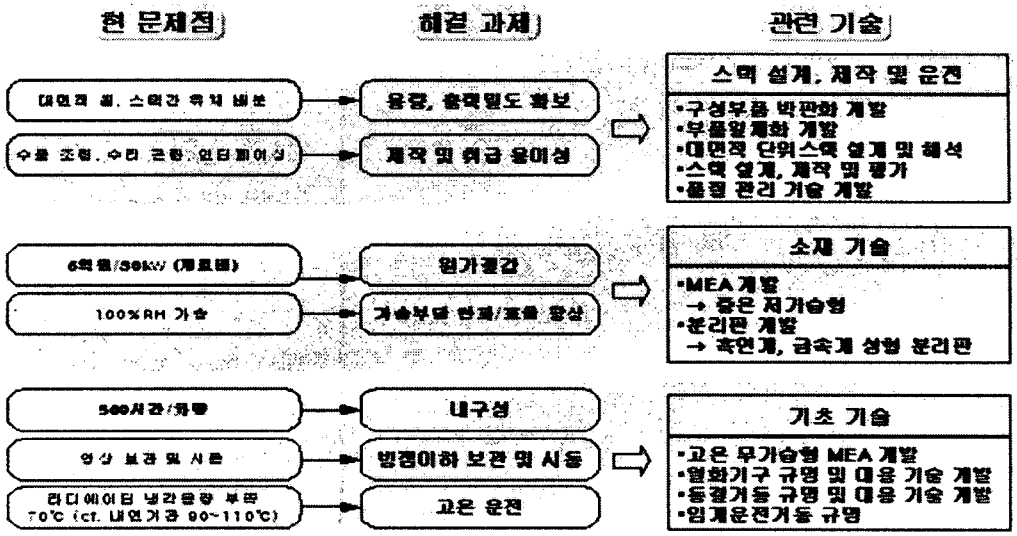


그림 5 80kW급 스택 개발 해결 과제 및 관련 기술

용량 증대 및 출력 밀도 개선을 위한 대면적화, 구성 부품 박판화 및 경량화 기술 개발이 요구되며, 또한 유로의 열유체 및 반응 해석 기술 개발이 요구된다. 또한 스택의 구성 셀 수가 증가함에 따라 모듈화 개발이 요구된다. 모듈화 개발 시 모듈을 연결하는 메니폴드 기술, 각 모듈의 체결 기술, 모듈을 차량에 장착하는 기술, 진동에 견디는 설계 기술 등의 개발이 요구된다. 체결 기술은 스택의 성능 및 내구성을 결정하는 주요한 기술로서, 스택을 구성하는 각각의 단위전지가 균일한 면압을 가지도록 설계되어야 한다. 일반적으로 셀 수가 증가할수록 체결 기구에 인접한 셀의 경우 체결기구에 의한 영향으로 면압 분포의 차이가 발생한다.(그림 4 참조) 또한 구성 부품의 열화 및 온도 변화에 의한 열사이클, 차량 진동 특성을 고려한 설계가 필수적이며, 스택의 출력밀도를 향상시키기 위해서 부피 및 무게를 최소화해야 한다. 또한 스택의 대용량화에 따른 문제로서 각 구성 단위전지로 가스 및 냉각수의 균일 분배 및 배기 측

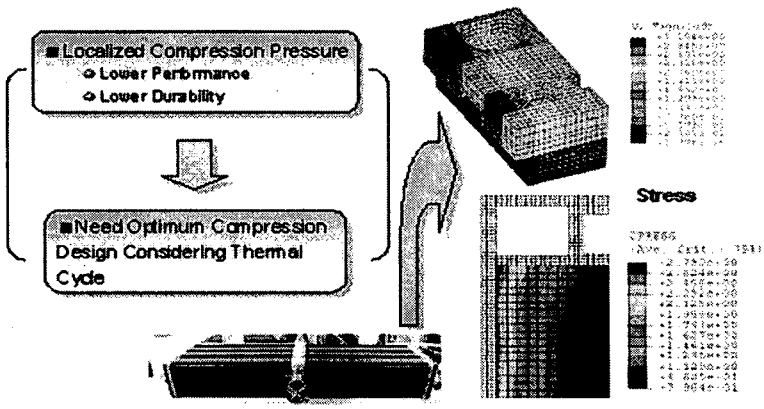


그림 6 스택 면압 해석

의 잔류 응축수 제거 등을 위한 메니폴드 설계 기술 개발이 요구된다. 스택의 적층 셀 수 증가에 따라서 차량의 급격한 부하 변동 시 메니폴드에서 불안정한 유동이 형성되어 메니폴드 근접 단위 전지에 순간적인 가스 공급 문제가 발생하므로 메니폴드 및 분배 설계의 해석 및 측정 기술 개발을 통한 최적 설계 기술의 개발이 요구된다. (그림 5 참조)

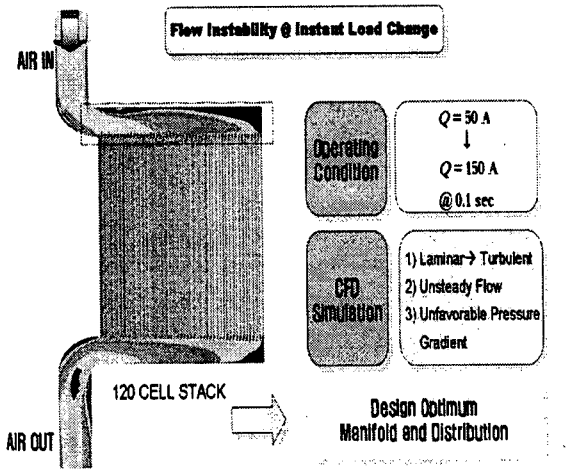


그림 7 메니폴드 유동 해석

또한 차량용의 경우 400~500개의 단위 전지로 구성되므로 각 단품의 품질 관리 기술 개발, 부품수를 줄이기 위한 일체화 기술 개발, 조립 및 취급을 용이하게 하는 모듈화 개발, 그리고 자동화 조립 공법 개발 등의 생산 기술 개발도 병행되어야 한다.

연료전지 스택이 상용화되기 위해서는 현재 80kW급 스택의 원가인 6억의 1/100정도로 가격을 저감해야 한다. 소량 시범 운행 단계에서는 5,000~6,000만원 정도면 시범 운행이 가능하므로 중간 단계로서 1/10 수준으로 가격을 낮추어야 한다. 가격의 대부분은 MEA와 분리판으로서 MEA의 가격 저감화와 더불어 현 기계가공 분리판을 대체하는 저가의 분리판 공법 개발이 진행되고 있으나, 현재의 기술적인 문제인 대면적화 및 박판화 개발이 이루어져야 하며 또한 생산 및 품질 관리 기술도 병행하여 개발되어야 한다.

연료전지 차량의 잦은 부하 변동과 작동 온도 변화, 차량 제한 및 결빙 등의 문제로 저가습 상태 운전등이 요구되는 데, 이를 해결하는 핵심 기술로 운전 조건 변화에 강인한 저가습 또는 무가습에서 작동되면서 고성능 고수명의 전극막 기술 개발이 필요하다. 전극막 개발 관련하여 국내의 경우 주로 정치형용으로 개발이 진행되었으며, 차량용으로 개발이 시급한 실정이다. 또한 장기적으로 시스템 단순화, 차량 냉각 부하 저감, 저가화등을 위해서 100~120℃에서 작동하는 무가습 전극막의 기술 개발이 요구되고 있으며, 현재 기술 수준이 초기 단계이므로 국내의 화학 업계 및 연구소에서 집중 개발을 통하

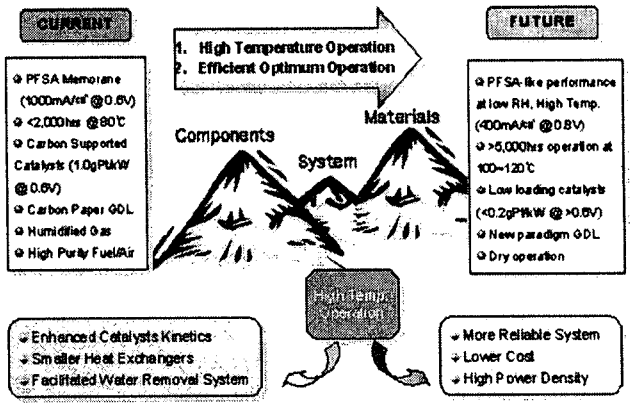


그림 9 현대자동차의 MEA에 대한 미래 요구 사양

여 향후 미래 시장 선점이 필요한 분야이다. 향후 자동차에 적용되기 위해서 MEA 측면에서 만족해야할 기술적인 지표를 그림 6에 나타내었다.

또한 연료전지의 내구성 및 영하 시동 문제를 해결하기 위해서는 스택 내부의 현상 규명과 더불어 설계 인자 도출이 필요하다. 현재 내구성 및 영하 시동 문제의 경우 문헌 및 자료가 미미한 상태로서 열화 원인규명 및 영하 이하의 거동에 대한 이해를 위한 계측 기술, 모델 및 해석 기술 개발을 통하여 스택 설계 인자간 상관성 규명을 통하여 스택 설계 기술에 적용되어야 한다.

기술적인 문제 이외에 해결되어야 하는 분야로 연료전지 관련 전문 연구 인력 부족과 요소 부품 업체 개발 및 육성이 요구된다.

3. 요약 및 향후 계획

상품성 및 실용성을 갖춘 80kW급 연료전지를 개발하기 위해서는 설계 기술 개발, 신재료 개발, 저가화 생산 및 품질 관리 기술 개발 및 열화 및 영하 이하 거동에 대한 기초적인 연구가 필요하다. 또한 연료전지 분야 전문 연구원 및 핵심 요소 부품 개발 업체 육성이 필요하다. 현대자동차는 국내의 산업계, 연구소 및 대학 등과 공동연구를 통하여 상기 과제를 해결하고자 하며, 국내 인적 자원 육성 및 부품 업체 개발을 통한 연료전지 개발 Network을 구축하고자 한다. 이러한 노력을 통하여 2007년까지 80kW, 0.8kW/L, -10℃, 1500시간의 차량용 연료전지를 개발하고자 하며, 2009년 80kW,1kW/L, -20℃, 2000시간의 목표(미 DOE 2008년 목표) 달성을 통하여 연료전지스택의 국제 경쟁력 및 연료전지 차량의 경쟁력을 확보하고자 한다.

4. 참고 문헌

[1]S.W. Kim, N.H. Kim, J.S. Choi, S.C. Oh, and J.H. Lee, Development of Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles Powered by Hyundai Fuel Cells", EVS20, California, USA, 2003

[2]J.H. Lee, S.W. Kim, H.R. Kwon, and S.W. Kwon, "Development of fuel cell hybrid vehicles fueled by hydrogen", The 6thInternational Conference on New Energy Systems and Conversions, Busan, Korea, 2003

[3]I.C. Hwang, S.W. Kim, N.H. Kim, J.H. Lee, S.H. Choi, and Y.S. Yoon, "Development of fuel Cell Hybrid Electric Vehicle Fueled by Methanol", SAE 2003-01-0421

[4]K.C. Lee, S.H. Choi, S.W. Kim, T.W. Lim, and W.S. Cho, "Hyundai Santa Fe FCV Powered by Power Plant Operating Near Ambient Pressure" SAE2002-01-0093