

PEM 연료전지 자동차 적용을 위한 성능실험에 관한 기초연구

이현근, 오병수, 정귀성

전남대학교 기계공학과

A Basic Experimental Study on Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cell System for Vehicle

Hyun-kun Lee, Byeong-soo Oh, Kwiseong Jeong

Dept. of Mechanical Eng. Chonnam National Univ.

Abstract

Not only study of fuel cell performance but study of fuel cell application is very important, therefore these studies were paralleled together for the commercialization of exciting power generation.

The objective of this study is to determine the characteristics of shaft power and efficiency as a function of rpm and to compare natural convection air method to forced air method. From these results, performance of forced air was better than that of natural convection air because it enables to improve mass transportation by increasing air flow rate. With decreasing shaft power, efficiency of fuel cell decreases remarkably because dc motor drives at the low range of efficiency. Fuel cell powered vehicle has to be driven considering efficiency and shaft power. It should be driven at 35-45% of efficiency and 0.55-0.75v/cell.

초록

연료전지 응용분야에 대한 실험연구는 연료전지 성능향상 등의 기초연구와 더불어 매우 중요하며 차세대 동력원으로써 상용화되기 위해서는 이러한 연구가 함께 병행되어야 한다. 본 실험은 고분자 전해질형 연료전지(PEM Fuel Cell)의 시스템을 차량에 적용할 수 있도록 연료전지스택의 기본특성 및 rpm에 따른 축출력과 효율 특성을 알아 보았으며 자연대류 공기방식과 강제 공급방식간의 전압, 전류, 출력특성을 비교 분석하였다.

본 실험을 통해 자연대류방식의 경우 반응공기량의 제한으로 인하여 항상 전류한계 성향이 나타나는 것을 알 수 있었으며 강제공기 공급방식은 성능면에서 자연대류 공급방식보다 우수하였다. 이것은 자연대류 방식과는 달리 공기유량 및 속도의 증가로 인하여 공기가 공기극에서 원활히 반응하였기 때문이다. 축출력에 따른 효율변화는 조합시스템의 경우 축출력이 낮아질수록 연료전지 효율과 달리 현저히 감소하였으며 이는 모터가 효율이 낮은 범위에서 구동되었기 때문이다. 연료전지 자동차는 축출력과 스택의 효율을 고려한 운전이 이루어져야 하며 스택의 효율이 35%-45% 범위인 0.55-0.75V/cell에서 이루어져야 한다.

1.서론

20세기이후 대기오염은 인간 생활의 커다란 문제로 대두되었다.¹⁾⁴⁾ 화석연료는 매장량에도 한계가 있을 뿐만 아니라, 환경오염의 주요 요인이 되어 왔다.⁵⁾ 특히 자동차는 운송용으로써 가장 큰 몫을 차지하고 있지만, 유해한 배기가스의 방출로 인해 환경 오염뿐만 아니라 인체에까지 커다란 악영향을 미치고 있다. 앞으로 대두되어질 에너지원의 고갈과 환경오염을 고찰해 본다면, 새로운 무공해 대체에너지와 무한한 양을 가진 에너지 자원의 개발이 절실히 요구된다. 대체에너지는 공해물질을 배출하지 않으면서 풍부한 유용성과 고효율의 경제적 가치를 가지고 저장운송에 용이해야 한다. 이러한 면에서 볼 때 수소야말로 가장 유망한 대체연료라고 볼 수가 있다.⁶⁾⁷⁾ 특히 고효율, 서공해를 지향하는 대체에너지 기술 중 수

소연료전지 기술이 가장 확실한 차세대 발전 기술로 최근에 인정되고 있으며 수소와 산소를 통한 전기 화학반응에 의하여 연료가 가지고 있는 화학적 에너지를 직접 전기 에너지로 변환시켜 주는 수소연료전지야말로 미래의 동력원으로써 중요한 역할을 차지할 것이다.⁸⁾⁹⁾

최근 국내의 연구방향은 연료전지의 성능향상 및 수명연장을 위한 재질의 향상 등에 대한 기초적 연구가 이루어지고 있다. 물론 기초적 연구가 중요하지만 연료전지가 응용될 분야에서의 효율적 운전조건과 특성을 파악하는 것도 매우 중요하다고 볼 수가 있다.

자동차용 동력원으로써 쓰이기 위한 연료전지 스택과 DC 모터를 조합한 시스템의 운전특성 및 효율적 운전을 위한 조건, 시스템 효율 등에 대한 연구가 필요하며 국내에서는 미미한 실정이므로 본 연구의 의미는 크다고 할 수 있다.

본 연구에서는 셀 적층수를 변화해 가면

서 연료전지의 전압, 전류 및 출력특성을 파악하였다. 열역학적인 고찰을 통해 출력에 대한 연료전지스택 자체의 효율특성을 파악하였으며 DC 모터를 조합하였을 때의 시스템 효율특성과 비교하였다. 그리고 rpm변화에 따른 축출력과 축토포크 특성을 파악하였으며 이 때의 연료전지와 조합시스템간의 성능변화를 검토하였다.

본 연구를 통해 운송수단의 가장 기본적인 역할을 담당하고 있는 자동차에 연료전지가 적용될 수 있는 계기를 마련하고자 한다.

2. 이론

연료전지는 연료중의 수소와 공기중의 산소가 전기 화학적 반응을 하여 직류전원을 발생하는 장치로써 연료전지 자동차에 적용되었을 때 연료전지 조합시스템 효율의 기본 식은 다음과 같다.

표준상태 Gibbs 에너지 (ΔG)는

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2-1)$$

이고, 여기에서 ΔH 는 반응의 엔탈피변화, ΔS 는 반응의 엔트로피변화를 나타낸다.

연료전지의 이론적 효율은

$$\eta_{theo} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = 1 - \frac{T\Delta S}{\Delta H} < 1 \quad (2-2)$$

연료전지 스택 자체만의 실제적 효율은 다음과 같다.

$$\eta_{fc} = \frac{W_{fc}}{\dot{m}_{H_2, used} \times HHV} \quad (2-3)$$

이고, 여기에서 W_{fc} 는 연료전지 자체 출력이며 스택의 전압(V_{fc}) \times 스택의 전류(A_{fc})이며 $\dot{m}_{H_2, used}$ 는 소모된 수소량, HHV 는 고위발열량을 의미한다.⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾

연료전지 스택과 직류구동 모터를 조합한 시스템의 효율은

$$\begin{aligned} \eta_{sys} &= \frac{W_m}{\dot{m}_{H_2, used} \times HHV} \\ &= \frac{W_{fc} \times \eta_m}{\dot{m}_{H_2, used} \times HHV} \end{aligned} \quad (2-4)$$

이고, 여기에서 W_m 은 구동모터의 실제 축출력, η_m 은 모터의 효율을 나타낸다.

서브시스템(압축기, 냉각팬)을 고려한 연료전지 스택의 실제 출력은

$$W_{real} = W_{fc} - W_{comp} - W_{cool} \quad (2-5)$$

이고, 여기에서 W_{comp} 는 압축기 소요동력, W_{cool} 는 냉각팬의 소요동력을 나타낸다.

서브시스템을 고려한 연료전지 자동차의 실제 효율은

$$\eta_{auto} = \frac{W_{real} \times \eta_m}{\dot{m}_{H_2, used} \times HHV} \quad (2-6)$$

이 된다.

3. 실험

Fig.1은 연료전지 시스템의 실험장치를 나타내는 개략도이다. 실험장치는 연료전지 스택, 연료공급장치, 공기공급장치, 냉각장치, 구동장치, A/D 컨버터, computer로 구성되며 Fig.2는 실험장치의 signal flow를 나타낸 것이다.

본 실험에서 사용된 연료전지는 반응면적이 50cm²인 고분자 전해질형 연료전지이며 membrane은 Nafion 112, 10cm \times 10cm를 사용하였다. Electrode는 7cm \times 7cm의 크기이며 양쪽의 전극층을 지지해주기 위해 carbon cloth에 의해 덮여진 것을 이용하였다.

연료 공급장치는 고압 수소 용기로부터 check valve가 부착된 압력레귤레이터를 통하여 일정한 압력으로 연료전지 스택 내에 공급한다. 연료전지 스택입구에 mass flow controller를 설치하여 컴퓨터로부터 수소의 유량을 제어한다.

연료전지에서 반응하지 않은 수소는 solenoid valve를 통하여 대기 중으로 방출되도록 한다. 공기 공급은 자연대류방식을 이용하거나 공기압축기에 의해 강제로 연료전지 스택 내로 보내진다. 강제식의 경우 공기는 수소와 같은 방법으로 압력레귤레이터와 mass flow controller를 사용하여 유량을 제어한다.

공기의 공급방식은 연료전지로 구동되는 자동차의 경우를 고려하여 자동차의 소모동력을 줄일 수 있는 대류공기식 연료전지 셀과 다소 소모 동력은 생기지만 출력면에서 대류식보다 우수한 강제식을 모두 적용하였으며 기존의 수소-산소(공기)의 완전 밀폐형 연료전지와는 구조가 다르게 공기의 강제적 공급방식을 적용하기 위해 대류공기 방식 연료전지의 하단부에 본 실험실에서 직접 제작한 외부형 공기 폴드를 설치하여 공기가 채널을 통과하도록 설계하여 실험하였다.

연료전지스택의 입구와 중앙 및 출구의 온도는 thermocouple을 사용하여 측정하였으며, 연료전지스택 입구의 수소와 공기의 압력은 OMEGA사의 PX181 pressure transducer를 사용하여 측정하였다. 측정된 데이터들은 A/D 변환기를 통하여 컴퓨터로 보내져서 저장된다.

연료전지의 작동 및 제어는 본 실험실에서 직접 Qbasic을 이용하여 만든 프로그램을 이용하였으며 수소의 누설로 인한 폭발을 방지하기 위하여 수소센서를 설치하였으며 수소가 누설되면 자동으로 연료전지 작동이 중단되도록 하였다.

본 실험은 연료전지 적층 수를 변화시켜 수소유량을 일정한 상태로 유지시키면서 자연대류방식과 강제공급 방식의 성능을 비교, 분석하였으며 각 공기 유량에 따른 연료전지의 성능변화를 측정하였다. 또한 공급되는 수소의 유량과 방출되는 수소의 유량을 통해 실제 소모되는 수소의 양을 측정하였으며 최대출력에서의 수소의 소모량을 구하였다. 이를 기준으로 연료전지 자체의 열역학적 효율을 고찰하였으며 기존 내연기관의 성능실험과 같이 rpm과 토크 및 출력을 측정하여 연료전지와 모터간의 관계를 고찰하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 수소 공급유량에 따른 영향

Fig.3는 3 cell에서 상압으로 수소를 공급하였을 때의 성능을 나타낸 것으로 이 때의 공기공급방식은 모두 대류방식이다. 3 cell에서 수소유량의 변화에 따른 저전류영역에서의 전압은 거의 같은 값을 가진다. 이는 연료전지의 활성화 과전압 즉, 전극반응에서 필요한 활성화 에너지가 전압으로 전환됨으로써 발생하는 과전압이 거의 수소유량변화에 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다. 중간전류영역에서의 수소유량에 따른 전압의 차이는 스택내의 내부저항인 전해질저항, 전극자체 저항, 적층 시 접촉저항 등의 전압손실을 고려한다면 수소유량은 거의 영향을 미치지 않는다고 할 수 있다. 높은 전류영역에서는 유량의 변화에 따라 성능의 차이가 나는 것을 알 수 있으며 공급되는 수소 유량의 증가와 농도의 증가에 의하여 성능이 향상되었다. 수소의 공급유량은 높은 전류영역에서 밀접한 관계를 가진다는 것을 알 수 있으며 대류방식의 경우에는 충분히 수소를

공급하였음에도 반응공기량의 제한으로 인하여 항상 한계전류성향을 띤다는 것을 알 수 있다.

수소이용율에 대한 식을 이용하면 최소공급량을 알 수 있으며 연료전지 성능 및 수명향상을 위해서는 반드시 최소공급량 이상이 공급되어야 한다.

$$\begin{aligned} \text{수소이용율}(\%) &= \frac{\text{소모된수소량}}{\text{공급된수소량}} \times 100 \\ &= 6.974 \times 10^{-1} nI/f_H \quad (4.1) \end{aligned}$$

여기에서 n 은 적층된 셀 수, I 는 생성된 직류전류(A), f_H 는 공급된 수소량(ℓ/min)을 나타낸다. (4.1)식으로부터 4A의 운전조건에서 단위전지 성능을 얻기 위해서는 수소가 최소한 $0.028 \ell/\text{min}\cdot\text{cell}$ 이 공급되어야 한다.

3 cell의 경우, 대류방식으로 수소유량을 상압, $0.1 \ell/\text{min}$ 으로 공급하였을 때 4A에서의 전압은 1.45V 이며 수소이용율은 83.7% 이다. 수소유량을 상압, $0.6 \ell/\text{min}$ 으로 공급하였을 때 4A에서의 전압은 1.7V 이다.

4.2 공기 공급유량에 따른 영향

수소의 유량은 일정하게 충분히 공급해준 상태에서 강제공기공급방식을 대류공기방식의 연료전지에 적용하고자 본 실험실에서 직접 제작한 공기 폴드를 연료전지 스택에 장착하였다. 3 cell에서 수소의 공급량은 상압, $0.6 \ell/\text{min}$ 로 일정하게 공급하고 공기량을 상압에서 자연대류, $0.6 \ell/\text{min}$, $1.43 \ell/\text{min}$ 으로 공급해 가면서 실험을 하였다. 최소 공기공급량은 공기이용율에 대한 식을 이용하여 알 수 있으며 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{공기이용율}(\%) &= \frac{\text{소모된산소량}}{\text{공급된공기량} \times 0.21} \times 100 \\ &= 1.66 \times nI/f_A \quad (4.2) \end{aligned}$$

여기에서 n 은 적층된 셀 수, I 는 생성된 직류전류(A), f_A 는 공급된 공기량(ℓ/min)을 나타낸다. Fig.4와 Fig.5는 각각의 공기유량

을 변화했을 때 3 cell에서의 전압-전류와 출력-전류특성을 비교한 것이다. 수소유량의 변화와 마찬가지로 공기의 유량변화에 따른 연료전지의 성능은 낮은 전류영역에서의 전압의 손실 값은 거의 비슷하며 중간 전류영역인 4A에서의 각각의 전압 값은 1.7V , 1.94V , 2.15V 이며 (4.2)식으로부터 공기유량 $1.43 \ell/\text{min}$ 의 경우, 4A에서 공기이용율이 14% 이다. 높은 전류영역에서는 각각의 전압 차이가 더욱 증가하였다. 따라서 높은 전류영역으로 갈수록 공기유량의 변화와 더불어 전압의 차이 값이 증가하였으며 대류공기방식과 공기 공급유량이 최소공급량보다 적을 경우 한계전류 성향이 나타나는 것으로 보아 공기의 공급유량이 연료전지 성능에 크게 영향을 준다는 것을 알 수 있었다.

수소유량은 일정하게 하고 공기의 공급방식을 자연대류방식과 강제공급방식으로 보냈을 때의 성능을 비교하기 위하여 3 cell에서 수소를 $0.6 \ell/\text{min}$ 으로 일정하게 공급하였다. Fig.4와 Fig.5에서 낮은 전류영역에서의 전압 값은 거의 일치하였으며 중간 영역과 높은 영역의 전류에서는 점차 전압차이가 증가하였다. 대류방식의 경우는 높은 전류영역에서 공기반응량의 제한으로 인하여 한계전류성향이 나타나는 것을 볼 수 있다. 연료전지 성능의 증가는 공기의 강제방식으로 인한 공기 이동속도의 증가와 유량의 증가로 인하여 성능이 향상된 것을 알 수 있다.

4.3 출력에 따른 연료전지 효율의 특성

정지형 발전용 연료전지의 경우는 낮은 전류밀도에서 운전을 하여 높은 효율을 유지하는 것이 유리하다. 그러나 이동전원용인 자동차의 경우에는 효율은 낮지만 높은 전류밀도와 높은 출력에서 운전이 이루어져야

한다. 그러나 자동차의 연료저장의 제한을 고려한다면 효율과 출력 모두를 고려하는 것이 바람직하다. Fig.6은 서브시스템의 소모동력을 고려하지 않은 연료전지스택 자체의 효율을 동력에 따라 나타낸 것이다. 상당히 낮은 전류영역에서 효율이 증가한 것을 볼 수 있으며 점차 출력이 증가할수록 효율이 현저히 감소하다가 중간영역에 이르면서 거의 일정한 효율을 보인다. 높은 전류영역에서는 급격히 효율이 감소하고 더불어 출력도 함께 감소하는 것을 볼 수 있었다. 높은 영역에서의 출력감소는 급격한 전류의 소모에 따른 전압의 강하에 기인한 것이다. 자동차용으로써 적합한 정상주행 운전범위는 여유동력을 고려한 중간출력영역에서 이루어져야 하며 가속 시에는 다소 효율은 저하하더라도 출력이 감소하지 않는 영역인 곳에서 이루어져야 한다. 정상주행과 가속시의 경우 스택의 효율이 35%-45% 범위인 셀 당 전압은 0.55-0.75v/cell에서 연료전지가 작동하여야 한다. 실제 서브시스템을 고려한 연료전지 자동차의 경우는 낮은 전류영역의 경우 공기압축기나 냉각 팬 등 소모전압에 따른 출력저하로 인해 효율의 저하가 이루어져서 낮은 전류 영역의 효율은 중간 전류영역의 효율과 비슷하게 될 것이다. Fig.7과 Fig.8은 16 cell에서의 연료전지의 성능을 나타낸 것이며 최대출력은 9A에서 62W이다.

4.4 연료전지 스택 효율과 조합시스템 효율의 비교

Fig.9는 16 cell에서 축출력에 대한 연료전지 스택과 조합시스템의 효율을 나타낸 것이다. 높은 축출력 영역에서는 연료전지와 조합시스템간에 서로 비슷한 경향을 띠었으며 낮은 축출력 영역에서는 시스템의 효율이 떨어진 것을 알 수 있다. 이는 스택 출력

이 모터의 최소 구동조건을 충분히 만족시키지 못하여 효율이 낮은 범위에서 구동되었기 때문이다. 적절한 모터의 선정은 매우 중요하다고 할 수 있다.

4.5 RPM에 따른 조합 시스템의 특성

Fig.10은 rpm에 따른 모터의 축출력과 축토크 및 연료전지의 성능특성을 나타낸 것이다. 축출력과 축토크는 일반 DC 모터의 특성과 비슷한 경향을 띠었으며, 축출력은 800rpm에서 최대치를 나타내었고 축토크가 증가하고 rpm이 감소할수록 현저히 감소하였다. 이는 연료전지의 전압강하와 더불어 모터구동의 최소 필요전압의 부족으로 인해 모터의 효율이 현저히 낮은 범위에서 작동하였기 때문이다. 연료전지의 성능에 적합한 DC 모터의 선택 또한 매우 중요하다. rpm에 따른 연료전지의 출력의 경우, 무부하에서 rpm이 증가할수록 증가하다가 400rpm에서 최대치를 나타냈으며 이후 급격히 감소하였다. 따라서 시스템의 최대 축출력과 연료전지 최대출력의 조건이 다르다는 것을 알 수 있다. 따라서 연료전지 자체의 출력만의 운전과 축출력의 조건을 함께 고려해야 한다. Fig.11은 rpm에 대한 축출력 특성을 공급유량 변화에 따라 비교한 것이다. 수소유량을 0.35 l/min, 대류공기방식으로 공급하였을 때는 rpm에 따른 축출력의 변화는 거의 없었으나 수소와 공기의 유량을 충분히 공급 할수록 rpm에 따른 축출력의 변화가 심한 것을 알 수 있었다.

5. 결론

본 실험을 통해 반응기체로서의 수소와 공기의 유량변화에 따른 고분자 전해질형 연료전지의 발전특성을 연구한 결과 다음과

같은 결론을 얻었다.

공급 수소량과 공급 공기량이 감소됨에 따라 낮은 전류영역에서의 스택전압-스택 전류곡선은 거의 영향을 받지 않았으며 높은 전류영역에서의 스택전압-스택 전류곡선은 농도 과전압의 증가로 인하여 성능이 현저히 감소하였다.

연료전지의 공기 공급방식에 따른 전압-전류곡선은 자연대류보다 강제식 공기공급 방식의 성능이 우수하고 이는 공기공급속도의 증가로 인하여 스택내부의 공기극에서 반응공기량이 증가한 것을 알 수 있었다. 공기는 대기 중에 존재하는 풍부한 물질중의 하나이지만 자동차에 많은 양의 공기를 공급한다는 것은 그에 수반된 대용량의 압축기나 블로우어가 필요하게 될 것이며 실제 연료전지로 구동되는 차량의 효율은 상당히 떨어지게 될 것이다. rpm에 따른 시스템의 축출력과 축토오크는 모터의 특성과 비슷한 경향을 띠었으며 축출력은 축토오크가 증가하고 rpm이 감소할수록 감소하였다. 이는 모터가 낮은 효율범위에서 구동하였기 때문이며 적절한 모터의 선정은 중요하다. 차량용 연료전지의 최적 작동전압은 출력과 그에 해당하는 효율을 고려하였을 때 정상운전 시와 가속 시 스택의 효율이 35%-45% 범위인 셀당 0.55-0.75V에서 작동하여야 하며 연료전지는 충분한 여유출력을 가져야 한다.

참고 문헌

1. V. M. Schmidt, U. Stimming; "Hydrogen and methanol proton exchange membrane fuel cells.", Proceedings of the 11th World Hydrogen Energy Conference Stuttgart, Germany 23-28 June 1996, pp.1717-1726, volume 3.
2. J. Friedrich, ; K.E. Noreikat; "State of the art and development trends for fuel cell vehicles", Proceedings of the 11th World Hydrogen Energy Conference Stuttgart, Germany 23-28 June 1996 pp.1757-1766, volume 3.
3. Dr. G. Patil, Pandit ; "Alternative Fuels in Future Vehicles", Automotive Engineering, January, pp.39-43, 1996
4. F. Barbir(USA); "Technical Challenges in PEM Fuel Cell Development." Proceedings of the 12th World Hydrogen Energy Conference Buenos Aires, Argentina 21-25 June 1998. pp 1589-1596, volume 2.
5. A. R. NolteHeinzel, , O. Rau, M. Zedda(Germany); "Fuel Cells for Portable Applications.", Proceedings of the 12th World Hydrogen Energy Conference Buenos Aires, Argentina 21-25 June 1998. pp 1607-1610, volume 2.
6. V. Recupero, L. Pino, M. Lagana, A. Ciancia, A. Lacobazzi(Italy); "Fuel Cell Electric Vehicles. An Italian Project to Develop a Hydrogen Generator." Proceedings of the 12th World Hydrogen Energy Conference Buenos Aires, Argentina 21-25 June 1998. pp1611-1621. volume 2.
7. V. Gurau, H. Liu(USA); "Transport Phenomena in Two Dimensional Hydrogen- Oxxygen PEM Fuel Cells.", Proceedings of the 12th World Hydrogen Energy Conference Buenos Aires, Argentina 21-25 June 1998. pp1707-1718, volume 2
8. J. C. Ampheltt, L.M. Kearns, R.F.Mann, B.A. Peppy, J.P Salvador(Canada); "The

Simulation of a Membrane Reactor for Generation Hydrogen from Methanol for a PEM Fuel Cell Power System.”, Proceedings of the 12th World Hydrogen Energy Conference Stuttgart

9. W. Donitz; “Fuel cells for mobile applications, status, requirements and future application”, Proceedings of the 12th World Hydrogen Energy Conference Stuttgart, Germany 23-28 June 1996, pp.1623-1636, volume 2.

10. D. Staschewski(Germany); “Internal Humidifying of PEM Fuel Cells”, Proceedings of the 10th World Hydrogen Energy Conference Cocoa Beach, Florida, U.S.A. pp.1638-1646, volume 3.

11. J. Amphlett, R. Mann, B. Peppy(Canada); “On Board Hydrogen purification for Steam Reformer/PEM Fuel Cell Vehicle Power Plant” Proceedings of the 10th World Hydrogen Energy Conference Cocoa Beach, Florida, U.S.A. pp.1681-1690, volume 3.

12. J. C.amphlett, M. Farahani, R.F. Mann, B.A. Peppy, P.R. Roberge Royal Military College of Canada; “Operating Characteristics of a Solid Polymer Fuel Cell’, Progect Hydrogen” 91 Conference Proceedings, pp.195-204.

13. 이기춘, 조태권,장규진, 이종현, 노범욱, 권혁률, 김척수, 임태원, 조원석; “연료전지 하이브리드 추진자동차 설계기술 개발”, Proceeding of 7th Next Generation Vehicle Workshop, 1999년, pp.50-554

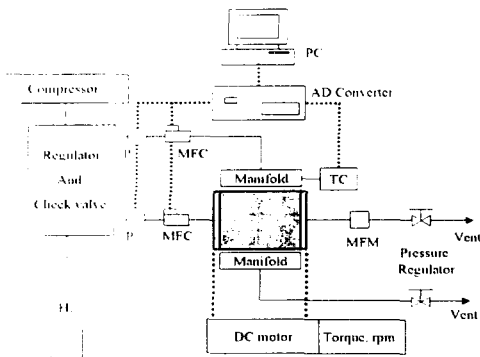


Fig.1 Schematic Diagram of the Experimental Apparatus

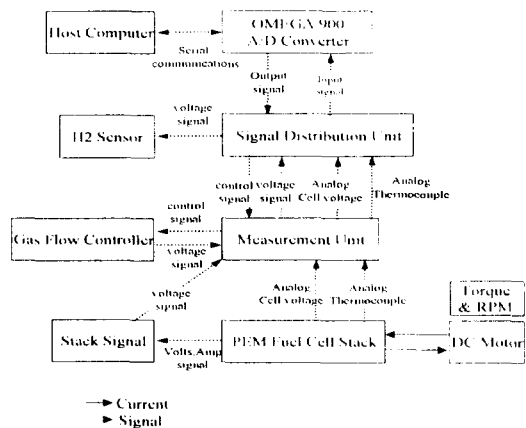


Fig.2 Block Diagram of Transducer and Control Signals

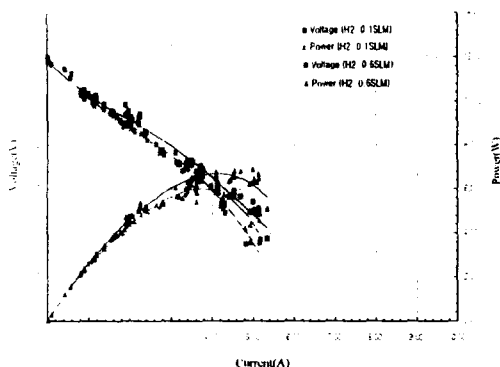


Fig.3 Stack Voltage and Stack Power vs. Stack Current (3 cells, hydrogen flow rate 0.1, 0.6 l/min, natural convection air, air temp. 17°C, relative humidity 46%, stack temp. 30-32°C)

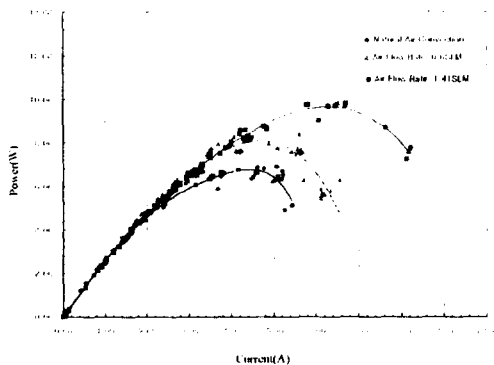


Fig.5 Effect of Forced Air Flow Rate on the Stack Power vs. Stack Current (3 cells, hydrogen flow rate 0.6 l/min, air temp. 16°C, relative humidity 50%, stack temp. 30°C)

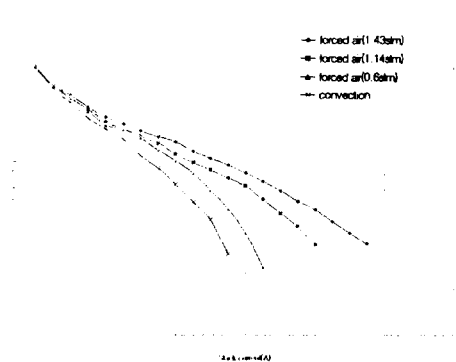


Fig.4 Effect of Forced Air Flow Rate on the Stack Potential vs. Stack Current (3 cells, hydrogen flow rate 0.6 l/min, air temp. 16°C, relative humidity 50%, stack temp. 30°C)

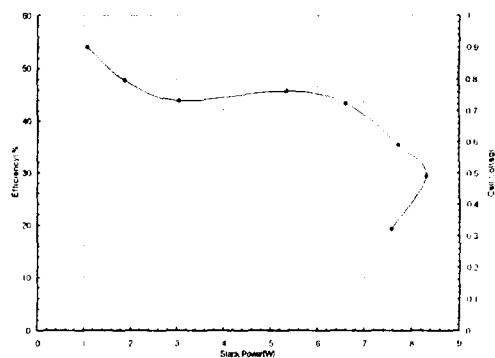


Fig.6 3 cells Efficiency and Cell Voltage as a Function of Net Power (hydrogen flow rate 0.6 l/min, forced air flow rate 1.4 l/min, air temp. 16°C, relative humidity 50%)

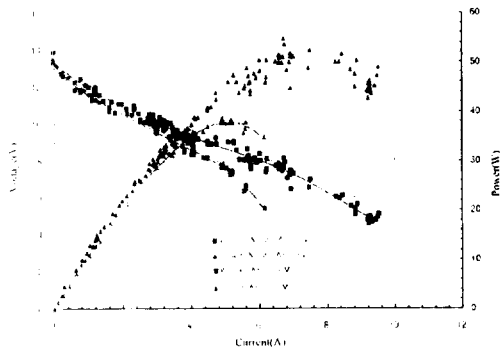


Fig.7 Stack Voltage and Stack Power vs. Stack Current (16 cells, hydrogen flow rate 0.87 l/min, air temp. 20°C, relative humidity 50, 64%, stack temp. 60-63°C)

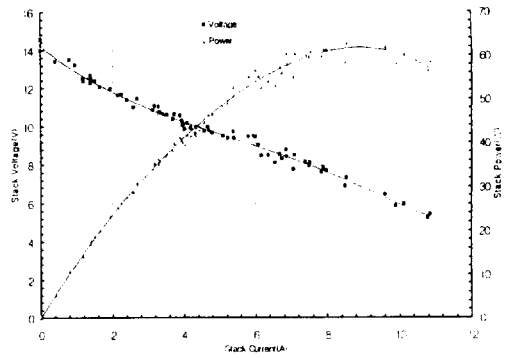


Fig.8 Stack Voltage and Stack Power vs. Stack Current (16 cells, hydrogen flow rate 1.44 l/min, forced air 4.6 l/min, air temp. 20°C, relative humidity 64%, stack temp. 59°C)

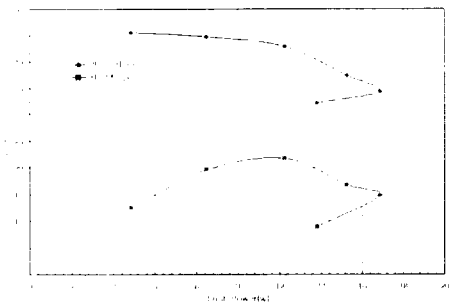


Fig.9 Stack Efficiency and System Efficiency as a Function of Shaft power (16 cells, hydrogen flow rate 0.87 l/min, forced air 4.0 l/min, air temp. 20°C, relative humidity 50%, stack temp. 63°C)

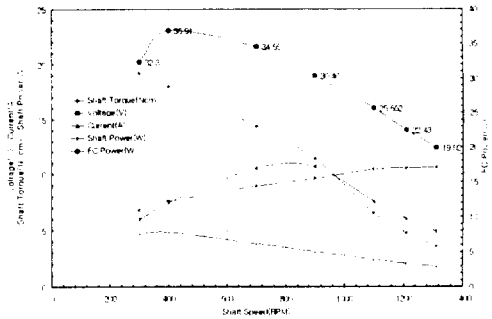


Fig.10 Stack Performance and Torque as a Function of RPM (hydrogen flow rate 1.10 l/min, natural convection air, air temp. 22°C, relative humidity 53%, stack temp. 66°C)

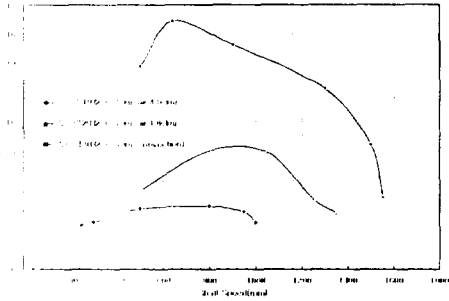


Fig.11 Shaft Power as a Function of RPM
(air temp. 22°C, relative humidity 53%)