

연료전지 자동차 추진용 엔진 시스템 개발

백 동 현, 이 원 용, 김 찬 수, 최 수 현
한국에너지기술연구소, 연료전지연구센터

Development of Fuel Cell Engine System for Electric Vehicle
D.H. Peck, W.Y. Lee, C.S. Kim, S.H. Choi
Korea Institute of Energy Research, Fuel Cell Research Center

1. 서론

연료전지(Fuel Cell)는 carnot 과정을 거치지 않고 연료의 화학 에너지를 전기 에너지로 직접 전환시키는 고효율의 전기화학적 발전장치이다. 기존의 내연기관은 실제 효율이 20-45%이지만, 연료전지는 40-65%의 효율로 운전할 수 있고 공해물질의 발생도 거의 없는 장점이 있다. 또한 다양한 대체 연료를 사용할 수 있어 석유에너지 절감과 대체 에너지 개발에 기여할 수 있다는 장점이 있다^{1, 2)}.

최근 선진국의 주요 자동차 제작사와 부품회사들이 연료전지를 동력원으로 사용하는 연료전지 자동차를 2003-2004년에 상용화하기 위한 연구와 개발에 박차를 가하고 있다. 자동차 엔진용 연료전지는 소형, 경량, 낮은 작동온도 및 빠른 시동특성 등을 구비하여야 한다. 이 조건에 가장 적합한 것이 고분자 연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cell, PEMFC)로 연료전지 자체의 효율을 비롯하여 부속 설비의 동력 등을 고려할 경우에 엔진의 효율이 약 40% 이상이어서 기존의 내연기관에 비해 성능이 월등히 우수하다^{1, 2)}.

본 논문에서는 시범용 자동차에 사용할 연료전지/축전지 복합구동 엔진의 개발을 위해 2000년에 1단계로 제작 실험한 10kW급의 연료전지 엔진시스템의 제작과 종합화 기술에 대해 설명하였다.

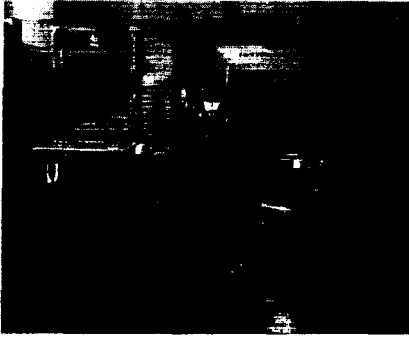
2. 연료전지 엔진 시스템

2.1 연료전지 스택 및 엔진 시스템

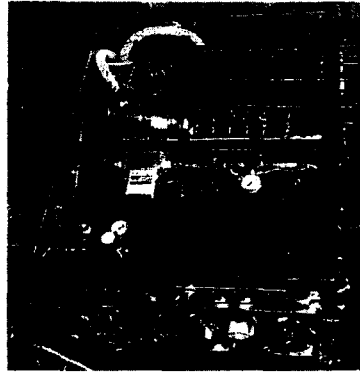
본 연구에서 제작한 연료전지는 반응 면적이 300cm²인 전지를 적층하여 수냉식인 스택을 구성하였다. 또한 가압 상태에서의 운전이 가능하도록 본 연구팀에서 개발한 실링 방법을 사용하여 일체의 반응 가스나 냉각수의 누출이 일어나지 않도록 설계 제작하였다. 10kW급 연료전지 시스템은 이와 같은 5kW급의 연료전지를 직렬로 연결하는 방식을 채택하여 제작하였다.

직접수소를 이용한 연료전지 동력장치를 개발하기 위하여 자동 운전되는 10kW 연료전지 스택 성능 시험장치(그림 1)와 자동차에 장착될 동력장치로 사용되는 15kW까지 운전이 가능한 연료전지 엔진 시스템(그림 2)을 제작하였다. 성능시험장치는 온도, 압력, 유량을 전자식으로 완전 자동 제어하도록 구성하여 정상상태는 물론 과도상태의 동적 특성까지 자동 성능 측정이 가능하도록 하였으며, 엔진은 부피 최소화하기 위해 공기유량과 온도제어를 제외하고는 기계식 압력조절기를 설치하였다.

연료전지의 공기 공급시스템은 스택에 공급하는 공기의 양과 압력을 조절할 수 있어야 한다. 연료전지의 성능 향상을 위해서는 가압공기를 공급하는 공기압축기가 사용될 수 있다. 자동차 엔진용 압축기는 자동차 탑재를 고려하여 소형인 것이 필요한데, 현재 국내 기술로는 용량에 적합한 소형 압축기의 제작이 어려우며, 외국의 전문업체 역시 현재 연구 개발 중이어서 자동차 탑재용 압축기의 판매는 이루어지지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 연료전지 엔진을 압축기 대신 블로어를 사용하는 상압 시스템으로 구성하였다. 공기유량은 인버터로 회전수를 제어하였으며, 압력은 스택 출구단의 밸브로 제어하였다. 유량과 압력은 PID 알고리즘으로 제어하였다.



[그림1] 10kW 연료전지스택 성능시험장치



[그림2] 10 kW급 연료전지 엔진

연료로 수소를 직접 이용하는 연료전지 시스템의 경우 자동차에 탑재된 액화나 압축수소 연료전지의 운전조건에 맞추어 감압되어 공급된다. 멤브레인의 가습을 위하여 가습기를 통과한 수소와 공기를 연료전지에 공급해야한다. 연료공급관의 전단에 설치된 제어 밸브는 스택의 보호를 위하여 공기공급관의 압력과 동일한 압력을 유지하면서 스택에 필요한 수소를 공급시킨다. 연료전지 출구에서 배출되는 수소는 연료전지 입구부로 재순환되도록 하였다. 수소는 부하 추종성과 스택내 물의 배출을 위해 연료전지의 이용율보다 높은 값으로 공급할 필요가 있다. 이를 위해 별도의 순환장치와 물제거 장치가 필요하다.

연료전지 엔진시스템에서 연료전지 스택의 압력제어 시스템의 최소화를 위하여 기계식 압력조절기를 사용하였으며, 성능시험장치에서는 정밀한 제어를 위해서 압력변환기와 서보 밸브 그리고 PID 제어기를 사용하였다.

연료전지 시스템의 냉각 및 물관리 시스템의 주요기능은 연료 및 공기의 가습, 생성된 물의 제거, 그리고 스택의 최적운전 온도 유지를 위한 냉각이다. 멤브레인의 프로톤 전도도는 가습량에 크게 영향을 받으며 동력밀도가 클수록 영향이 크다. 스택에서 생성된 물의 회수를 위해서 스택 출구부에 물회수장치를 설치하고 유량제어 제어 알고리즘을 구성하였다. 가습을 위해서는 가열식, 멤브레인식 등 여러 가지 방식이 고려되었으며, 가습량 조절을 위해서 펌프나 밸브에 의해 유량과 압력을 조절하였다.

스택의 온도는 냉각수 온도에 의해 조절되도록 3-way 밸브를 이용하여 제어시스템을 구성하였으며, 수질 유지를 위하여 냉각수의 일부가 계속 Deionizer filter를 통과하도록 하였다.

2.2 동력장치 운전 제어 시스템

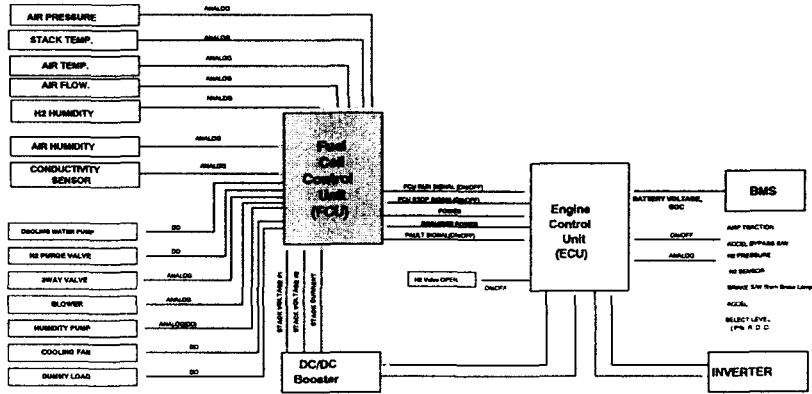
자동차용 연료전지 제어시스템은 크게 동력장치 제어(Engine Control Unit, ECU)와 연료전지 공정 제어 제어부(Fuel Cell Control Unit, FCU)로 구성될 수 있다. 이외에도 연료전지/축전지 복합구동 자동차의 경우, 축전지 관리시스템(Battery Management System, BMS), 그리고 축전지와 연료전지의 연계와 전력변환을 위한 장치(DC/DC booster)로 구성되어있다(그림 3).

감시제어기능을 수행하는 ECU에서 각 제어부 및 각종 센서에서 전달되는 정보를 이용하여 연료전지의 출력부하값을 설정하게 되며, 요구부하가 FCU에 전달되면 FCU에서 필요한 동력을 위한 공정제어를 수행하게 된다.

복합구동 동력원의 경우, 연료전지의 부하 크기는 DC/DC booster에서 제어되어 축전지와 연계되며 이 부하조건에 맞도록 연료전지 제어부에서 공기량과 연료량을 제어하게된다. 동시에 부하변화에 연동되어 스택의 압력과 온도가 제어된다.

연료전지의 공정제어를 위해서는 여러 종류의 센서와 구동기가 필요하다. 연료전지의 상태정보를 파

악하기 위해 온도, 압력, 습도, 유량 등이 측정되며 이를 상태값이 제어밸브와 유체기계들에 의해 제어 된다.



[그림 3] 연료전지자동차 제어시스템 구성

2.3 연료전지 시스템의 특성

연료전지/축전지 복합구동 전기자동차의 에너지원으로서 고분자 연료전지 시스템을 구성하여 연료전지의 정상상태의 성능과 공정의 유량과 압력제어등의 동적특성을 실험하였다. 부하에 따른 연료와 공기 유량과 압력제어 특성은 사용하는 밸브나 유체기계의 동특성에 좌우될 수 있다.

수소는 재순환되므로 입구부에서 압력제어를 통해 사용된 유량만큼 보충되며, 부하제어는 공기유량 조절을 통해 수행되므로 연료전지 공정설비의 동특성은 급기시스템에 의해 결정된다.

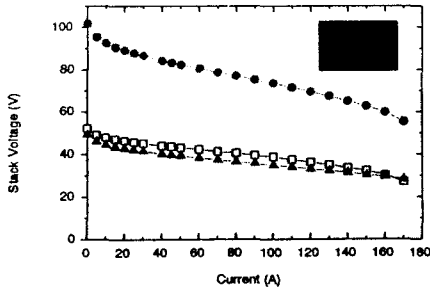
공기유량을 블로어의 회전수로 제어할 경우 제어방법에 따라 다소 차이가 있으나 유량을 50%에서 100%까지 조절하면 약 2-3초 정도의 지연이 발생하였다. 따라서 빠른 부하 추종을 위해서는 축전지를 이용하거나 공기 저장탱크를 이용하여 부하에 따라 즉시 필요한 유량을 공급시켜줄 필요가 있다.

고성능의 연료전지를 위해서는 가압 공기와 연료가 필요하나, 본 연구에서는 국산 블로어를 이용하여 공기를 공급하였으며, 스택입구 압력이 공기와 수소측 모두 0.17bar인 상압에서 실험하였다.

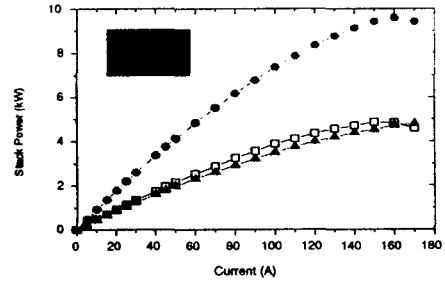
5kW급 연료전지 스택 2개로 구성된 연료전지 각각과 전체 연료전지 시스템의 I-V 특성과 동력을 그림 4과 그림 5에 각각 나타내었다.

10kW 연료전지 시스템은 각각 56개의 셀과 53개의 셀로 구성된 2개의 5kW급 연료전지 스택(스택 1과 2)으로 구성하였다. 이들 스택을 상압의 공기와 수소를 사용하여 운전하여 각각 4.9kW와 4.7kW의 최고 성능을 얻었으며, 스택을 직렬로 구성하여 9.6kW (60V@160A)의 최고 성능을 얻었다. 이 때 각 셀의 평균 전압과 전류밀도는 각각 0.55V과 0.53A/cm²이었다(그림 4, 5). 스택의 최고 성능은 스택의 운전 온도 45℃와 상압의 수소와 공기를 각각 사용하여 얻은 것이다.

무부하와 일정 전류 100A의 조건에서 운전하여 얻은 스택 2의 각 셀당 전압 분포도 측정하였다. OCV 상태에서 102.5V의 전압(스택 1: 52.3V, 스택 2: 50.2V)을 나타내고, 각 셀의 평균 전압은 0.95V로 양호한 OCV 값을 나타내었다. 또한 스택 운전 전류를 100A에서 일정하게 유지하여 측정된 각 셀의 전압 분포도 측정하였다. 스택 운전 전류가 100A일 때 측정된 스택의 전체 전압은 34.4V이었으며, 각 셀의 평균 전압은 0.65V였다. 스택을 구성하는 셀들 중에서 셀 16-18번과 셀 21번의 4개 셀 만이 평균



[그림 4] 10kW 연료전지 엔진의 전압/전류 특성



[그림 5] 10kW 연료전지 엔진의 동력 특성

전압보다도 낮은 0.55 - 0.56V의 전압을 나타내었으나, 전체적으로 심하게 낮은 전압을 나타내는 셀은 관찰되지 않았다. 스택 1도 스택 2와 비슷한 전압 분포를 나타내는 것을 확인하였다.

3. 결론

연료전지 자동차 개발에 필요한 연료전지 스택, 연료 공급장치, 공기 공급장치, 냉각 및 물관리 장치 및 이들의 제어 시스템을 설계 제작하고, 동력변환장치를 연결하여 연료전지 시스템의 최적 종합화와 운전기술의 개발 연구를 수행하였다. 본 연구에서 개발된 연료전지/축전지 복합구동 엔진용 10kW급의 연료전지 엔진 시스템을 시범용 승용 자동차에 장착하여 실험을 수행하였다. 이 연료전지 엔진 시스템을 상압의 수소와 공기로 운전하여 9.6kW의 성능을 얻었다. 본 연구의 결과는 2단계에서 진행될 연구에서 스택을 비롯한 전체 시스템의 소형화, 경량화 및 최적 운전을 위한 자료로 이용할 것이다.

참 고 문 헌

- 1) W.C. Yang, L.B. Brandenburg, B. Bates, K.A. Oglesby, and K.D. Osborne, "Ford P2000 Fuel cell Vehicle", 16th Int'l Electric Vehicle Symposium, Beijing, China, 1999.
- 2) M. Ogbum. and D.J. Nelson, "Fuel cell efficiency in the Virginia Tech 1999 hybrid electric future-car", ENV'99 Conference, Ypsilanti, Michigan, 1999.