

# 인산형 연료전지/축전지 복합 구동 자동차 개념 설계

이봉도<sup>°</sup>, 이원용, 신동열

한국에너지기술연구소

## Basic Design of Phosphoric Acid Fuel Cell/Battery Hybrid Vehicle

Bong-Do Lee, Won-Yong Lee, and Dong-Ryul Shin

Korea Institute of Energy Research

### ABSTRACTS

Fuel cell systems offer high efficiencies for energy conservation for transportation application. In addition, they can operate on alcohols and alternative fuels, while producing little or no noxious emissions. The goal of the fuel cell in transportation should be research and commercialization of fuel cell vehicles as economic competitors for internal combustion engine vehicle. The objective of the present study is to analyze feasibility of the fuel cell/battery combination as a power source for a bus.

### 1. 서 론

연료전지는 발전 특성상 높은 에너지 변환 효율과 낮은 공해 물질 배출로 인해 동력기관으로서 매우 이상적인 시스템이다. 이러한 우수한 특성으로 인하여 최근 내연기관 자동차의 대체 엔진으로 선진 각국에서 활발히 연구가 시작되고 있다. 본고에서는 연료전지 자동차의 상업화를 위한 기본 단계로, 연료전지 자동차의 개념 설계 및 기술적 타당성 검토를 위하여 연료전지 기본 기술과 연료전지 자동차의 선진 각국의 기술 분석, 연료전지를 자동차에 적용시키기 위한 주요 고려 사항 및 설계 조건에 대해 다루었다. 또한 동력장치에서 중요한 전동기 및 축전지 그리고 인산형 연료전지를 이용한 도심형 하이브리드(연료전지+축전지) 버스의 개념을 설계하였다. 이러한 결과를 이용하여 연료전지 자동차의 개발 타당성을 입증하였다.

### 2. 자동차용 연료전지 시스템

#### 1. 시스템 구성

연료전지 본체는 화학에너지로 초기에너지로 변환시키는 반응 장치로, 자동차에 요구되는 동력을 발생시키기 위해서는 여러 가지 설비가 추가 설치되어야 한다. 즉 연료전지 구동 시스템은 기존의 내연기관과 마찬가지로 화학적 에너지를 동력으로 변환시킬 수 있는 제반 장치로 연료가 주입되어 자동차에 필요한 동력을 발생시킬 수 있는 종합시스템을 말한다. 연료전지 시스템은 기본적으로 그림 1과 같은 요소로 구성된다.

개질기는 탄화수소를 적당한 온도에서 수소로 분리시키는 장치이다. 개질에 필요한 일부 열은 연료전지에서도 공급받는다. 개질 후

처리부는 개질후 순수한 수소ガ스를 위해 적절한 온도로 가스를 냉각시키는 곳이다. 연료전지 오염물질 제거부는 연료전지의 운전에 나쁜 영향을 미치는 성분을 제거시키는 곳으로 고분자전해질 연료전지의 경우 이 과정에서 일산화탄소가 제거된다. 이 단계는 연료의 오염원 농도나 연료전지의 허용한도등에 의해 선택적으로 추가된다. 연료전지 본체는 수소와 산소가 반응하여 전기를 발생시키는 부분이다. 전동기는 전지에서 발생한 전기를 이용하여 기계적인 동력을 발생시키는 것이다. 전동기는 전기자동차에서 사용되는 것과 마찬가지로 연료전지 자동차에서도 필수적이다. 축동력 전달부는 전동기에서 발생한 기계적 회전력을 트랜스미션을 거쳐 자동차의 타이어로 전달시키는 부분이다. 이 부분의 기술도 전기자동차와 같다. 연료전지에서 정상상태에서 발생된 전력의 일부는 보조 축전지의 충전으로 사용된다. 충전된 전력은 첨두부하시 사용된다. 보조 축전지의 구성 역시 전기자동차와 유사하며 시스템의 시동시에는 축전지에 의존하여 시스템을 구동시킨다. 배가스의 처리 및 재생은 Anode의 가스를 이용하여 보조 열원으로 이용하던가 혹은 잔여 수소를 이용한 보조 연료로 사용한다.

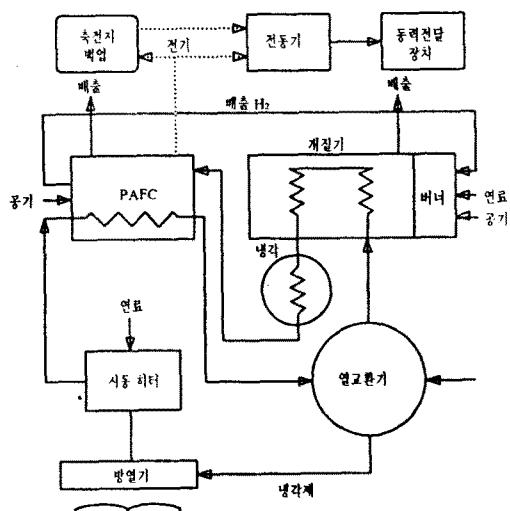


그림 1. 인산형 연료전지 구동 시스템

## 2. 설계 조건

연료전지 자동차는 시장성을 위하여 기존의 내연기관과의 성능면에서 경쟁성이 있어야 한다. 이를 위해 다음과 같은 사항이 고려되어야 한다.

- 운행구간이 금유당 320~483 km (200~300 mile)이 되어야 한다.
- 기존의 자동차와 같은 정도의 최고 속도와 등판력을 유지해야 한다.
- 기존의 자동차와 같은 정도의 승객수와 저장능력을 갖추어야 한다.
- 쉽게 급유가 가능한 연료를 사용해야 한다.
- 구입비 및 운영비가 기존의 자동차와 비교해 경쟁력이 있어야 한다.

트럭이나 버스와 같이 대형 상용 자동차는 엔진의 크기와 무게의 제한성이 승용차처럼 엄격하지 않으므로 연료전지 적용을 위해 매우 이상적이다. 또한 상용차는 일반적으로 중앙급유소에서 연료를 재충전하므로 일반 승용차와 달리 새로운 연료시스템의 적용이 쉽다. 이와 같은 이유에서 연료전지 구동 버스를 개발하기 위한 연구가 연료전지 승용차에 앞서 진행되고 있으며, 이미 일부의 버스가 제작되어 실험 중이거나 개발 계획이 진행중이다.

연료전지 승용차를 개발하기 위해서는 내구성, 운행 거리, 크기와 동력의 기술적인 문제점 이외에도, 초기 구입비와 운전비용도 고려해야 한다. 연료전지 승용차의 초기 구입비는 연료전지 엔진의 높은 제작단가로 인하여 기존의 자동차에 비해 높으므로, 기존의 자동차보다 2~3배 긴 수명과 운전비용으로 전체비용을 감쇄시켜야 한다.

연료전지의 주요 장점은 낮은 운전비용이다. 기본적으로 높은 변환 효율로 인해 주행 거리당 요구되는 연료비를 감소시킬 수가 있다. 이것은 화석 에너지 수요의 문제를 생길 경우 연료전지 자동차 개발을 위한 하나의 큰 원동력이 될 것이다. 이를 위해 가솔린이나 다른 대체 연료를 위한 탐색 개발기 및 수소를 위한 저장과 공급시스템의 연구 개발이 필요하다. 연료의 종류는 개별의 과정과 작업으로 연관되어 있다. 개별기의 기술 개발에 의해 승용차를 위한 개별기는 반드시 크기가 최소화되어야 한다.

자동차에 필요한 정격 동력을 연료전지에서 공급하여야 하므로 설계를 위한 요구 조건인 연료전지의 동력 밀도, 최대 출력, 운전비용 등이 내연기관에 비해 충분히 경쟁력을 가지고 있어야 한다. 설치 비용은 현재 인산형, 고분자전해질형, 내연기관이 각각 \$425/kW, \$280/kW, \$25~\$50/kW 이므로 이러한 가격 차이를 줄여야 한다. 또한 연료전지의 시동 특성, 공회전 및 대기시의 연료 소모 특성, 운송용으로 사용할 경우의 내구성 및 침수 부하에서의 내가속성, 7~10년 이상의 내구성 그리고 16만km 이상 운행할 수 있는 평균 수명, 재료 및 부품 구입의 용이성, 충격 및 유독성 가스에 의한 시스템의 안정성, 겨울철의 예열 온도 유지 등을 고려하여야 한다.

## 3. 연료전지/축전지 복합 구동 버스의 개념 설계

### 1. 동력원 구성 개념

연료전지 버스의 동력원 구성을 위한 주요 고려 사항으로는 동급의 디젤 엔진 버스와 같은 가속력과 등판 능력을 갖을 수 있어야 하며, 현재 수준에서 부품을 쉽게 조달할 수 있고, 디젤 버스와 비교하여 가격이 적절해야 한다.

자동차의 적용에서 연료전지 단독으로 운전하는 것보다는 축전지와 연계하여 운전하는 것이 기술적, 경제적으로 유리하다. 현재 연료전지의 가격은 약 \$550/kW로 축전지의 \$100/kW (20-min rate)에 비해 5배정도 비싸며 복합시스템으로 할 경우 연료전지 단독 운전의 경우보다 경제적이다. 또한 축전지의 동력 밀도가 연료전지보

다 높기 때문에 크기와 무게 면에서도 유리하다. Shunt connected 축전지를 사용할 경우 순간 부하 변화에 항상 대비할 수 있다. 최대 부하가 아닌 경우 연료전지를 이용하여 축전지를 충전하기 위해서 연료전지의 최대 최소 출력비는 최소화되어야 한다. 즉 연료전지는 자동차 운행시 항상 운전 상태에 있어야 한다.

이러한 이유로 버스의 동력원은 인산형 연료전지와 축전지가 병렬로 연결하여 구성하였다. 연료전자는 주요 에너지원으로 정격부하시의 에너지를 공급하고, 축전지는 가속시와 경사길을 오를 때와 같이 순간적인 부하 변화시 또는 보조 동력원으로 사용한다. 경부하시에는 연료전지의 출력이 축전지에 저장되고 최대 출력시에는 연료전지와 같이 부하를 분담하게 된다.

### 2. 설계 제원 결정

현재 상태의 연료전지 기술을 이용하여 자동차를 설계하기 위해서는 승용차에 비해 연료전지의 크기와 무게에 큰 영향을 받지 않는 버스를 선택하였다. 현재 수준의 기술을 이용하여 큰 기술의 개선 없이 이용 가능한 연료전지는 인산형 연료전지와 알칼리형 연료전지가 있는데, 자동차용으로는 연료사용성이 우수한 인산형 연료전지가 유리하다. 승용차에 적용이 가능한 고분자전해질 연료전자는 동력밀도면에서 다른 연료전지에 비해 자동차용으로 가장 우수하나 앞으로의 기술 개발이 더 필요한 상태이다. 따라서 현재 생산이 가능한 60kW급의 인산형 연료전지를 이용하여 중형 버스를 설계하였으며, 정격시의 동력은 연료전지가 담당하고, 순간 가속과 등판을 위하여 축전지를 사용하는 복합시스템으로 구성하였다. 이렇게 하여 선정된 동력장치 제원은 표 1과 같다.

동력원중 연료전지의 스택은 높이가 낮은 것이 진동이 문제되는 운송 시스템의 적용 및 연료 공급의 균형면에서 유리하다. 하지만 높이가 낮아지면 활성면적이 줄어들므로 동일한 출력을 위하여 스택의 갯수가 증가하여 전체의 무게가 증가하는 단점이 있다. 따라서 버스에서 요구하는 전반적인 설계 조건과 연료전지의 특성 그리고 버스에서 사용 가능한 공간 및 구조를 고려하여 버스용 연료전지를 설계하였다. 연료개질기는 축매로써 가격이 저렴한 구리/산화아연 (Cu/Zinc Oxide)를 사용하였으며, 높은 변환 효율이 되도록 설계하였다. 축전지 선정을 위하여 고려할 사항은 축전지 형태는 표 1. 설계된 동력 장치 제원

구 분	내 용
구동 전동기	형태 : 분리여자 직류 Shunt 전동기 동력 : 70 HP 정격, 105 HP 순시 전압/전류 : 128V/750A 크기 : 50.8cm D x 86.36cm L 무게 : 589 kg
전동기 제어기	형태 : 복합 전기자/Field 초퍼 최대 전력 : 800 Amp 회로 : 반도체 이용 solid state 제어 크기 : 86.36 x 30.48 x 20.32cm 무게 : 67.95 kg
변 속 장 치	형태 : 2단 속도 hypoid-Planetary 비 : Hypoid 기어, 5.38:1 planetary 1.39:1 정격 부하 : 7,928 kg 무게 : 244 kg
제 동 기	형태 : 공압 구동 드럼식 브레이크 크기 : 38.1cm x 17.78cm 무게 : 74.3kg
전달장치 (Drive line)	형태 : 이중 유니버설 조인트 길이 : 45.72cm 무게 : 27.18kg

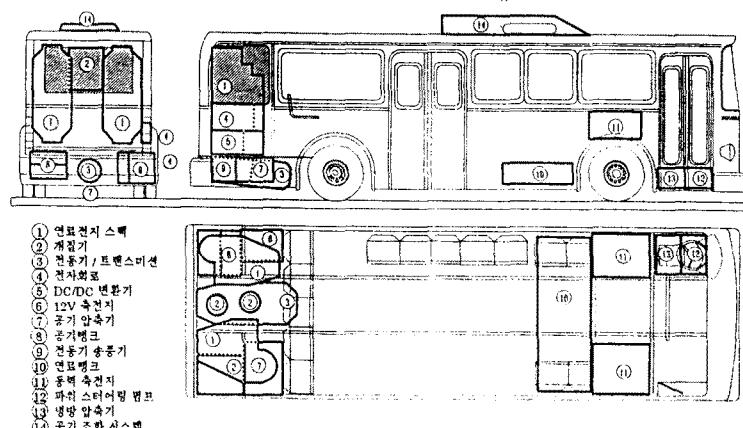
표 2. 연료전지와 연료개질기 및 축전지에 대한 설계 제원

부 분	항 목	제 원
연 료 전 지	스택의 활성 면적	1,125 x 2(cm <sup>2</sup> )
	단위전지 설계 전압	200(mA/cm <sup>2</sup> )(0.6V)
	스택 수	2 개
	스택당 셀수	240 개
	바이폴라판 형태	대칭 Z 형
	냉각 방식	분리공기 냉각 방식
	냉각판 형식	분리 채널형 냉각판
	정격 전압	140.8(VDC)
	정격 전류	400(A)
연 료 개 질 기	정격 충전력	56.7(kW)
	축매 충전량	0.75(mg/cm <sup>2</sup> )
	스택 무게	702(kg)
	스택 높이	1.5(m)
	축매충 부피	28.3(l)
축 전 지	축매 무게	38.5(kg)
	시간당 연료 소모량	15.9(kg)
	축매충 열전달 면적	3.16(m <sup>2</sup> )
	증발기/파열기 열전달 면적	0.85(m <sup>2</sup> )
	전체 높이	0.915(m)
	무게	204(kg)
축 전 지	축전지 종류	Ni-Cd (Non-sintered)
	전지셀 수	100개
	용량	200(Ah)
	에너지 용량	24(kWh)
	크기(5셀 모듈) LxWxH(cm)	27 x 18.4 x 24.8
	무게	544(kg)

표 3. 연료전지/축전지 복합 구동버스의 제원

구 성 요 소	규 격	구 성 요 소	규 격
바닥 높이	0.64 m	차석 인원(입석)	20(15)
Wheel Base	4.7 m	Suspension형	공압형
내부 높이	2.0 m	제동장치	공압
접근각	11 deg	크기 (LxWxH)(m)	8.4 x 2.39 x 2.67
출발각	11 deg	타이어(전륜과 후륜)	275/70 R 22.5
회전 반경	9.15 m	무게(Weight(curb))	8,570 kg
앞문	0.76 m	총무게(+승객+운전사)	10,265 kg
전면Overhang	1.83 m	운전 장치	유압, 동력 보조
후면Overhang	1.88 m	Parking Brakes	스프링형, 공기 방출
지면과의 간격	0.25 m		단조일루미늄디스크
뒷문	1.02 m		

그림 2 연료전지 축전지 복합구동 버스 구성도



Pb-Acid, Ni-Cd, Ni-Zn으로 하고, 정격 용량은 50-500(Ah), 방전 전류는 0-500(A), 충전 전류는 0-280(A)의 범위를 가져야 한다. 아래 표 2는 연료전지와 연료개질기 및 축전지에 대한 설계 제원이다. 여기서 단위전지 성능은 상용화가 가능한 시점에서는 300(mA/cm<sup>2</sup>) (0.66V) 까지 도달할 수 있을 것으로 크기 및 무게가 좀 더 작아질 수 있다.

이러한 설계 제원을 바탕으로 하여 설계한 전체적인 연료전지/축전지 복합 구동버스의 제원은 표 3 과 같고, 연료전지/축전지 복합 구동 버스의 구성도는 그림 2 와 같다.

#### 4. 결 론

자동차에 연료전지를 적용할 경우 기존의 내연기관에 비교하여 일코올과 가스 등의 대체연료를 사용하여 효율이 높은 대체 동력원으로 사용할 수 있으며, 성능의 저하나 가격의 상승 없이 현재 및 강화될 미래의 환경 규제에 적합한 저공해 자동차를 제작할 수 있다. 또한 연료전지/축전지 복합구동 동력원을 사용한 도심형 버스가 요구하는 제한 동특성을 만족하는 설계를 하였다.

연료전지 자동차의 연구 시작 단계에서는 기술이 유사한 전기자 동차의 기술, 즉 구동 전동기, 보조 축전기 등의 기술을 채용하는 것이 바람직하고, 크기나 무게의 제한이 적은 버스와 같은 대형차가 유리하며, 에너지 밀도가 높아 승용차에 사용 가능한 고분자전해질 연료전지나 그 밖의 연료전지는 개발 단계이므로 연구가 더 필요하다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 신동열 외, 인산형 연료전지 단위전지 요소기술 개발, 통상산업부, 1995.2.
- [2] J.M. King, Assessment of Phosphoric Acid Fuel Cells for Vehicular Power Systems, FCR-4059, 1982.
- [3] M. Krumpelt and C.C. Christianson, An Assessment and comparison of Fuel Cells for Transportation Application, ANL-89/28
- [4] R. Kumar, S. Ahmed, M. Krumpelt, and K.M. Myles, Methanol Reformer for Fuel Cell Powered Vehicles: Some Design Considerations, 1990 Fuel Cell Seminar, Phoenix, Arizona, Nov. 25-28, 1990 .