

전기자동차의 실용화 기술

- 하이브리드 전기자동차와
NiMH축전지를 중심으로 -

황 영 문

부산대학교 전기공학과 교수

1. 머리말

내연기관으로 구동되는 자동차의 매연으로 인한 대기 오염의 심각성이 오래 전부터 부각되어 왔다. 물론 현대의 자동차 배출가스량은 초기의 자동차에 비해 적어졌지만 그 대책이 될 수 있을 정도는 아니며 또한 오래 사용할수록 청정도가 계속 떨어진다. 더욱이 많은 인구를 가진 중국과 인도 등에서 자동차의 사용이 급증할 것으로 예상됨에 따라 근원적으로 환경오염물질을 배출하지 않는 자동차를 개발하지 않는 한 전세계적으로 공기오염의 정도는 훨씬 더 심각하게 될 것이다.

그래서 선진국들을 중심으로 이에 대한 대응책을 마련하는데 부심하여 왔으며 그 중 가장 적극적인 대책이 전기로 구동되는 차량으로 대체하고자 하는 것이다. 이미 수 년 전부터 미국의 General Motors나 Ford, 프랑스의 Peugeot Citroen, 그리고 일본의 Toyota 등 세계적인 주요 자동차회사에서 시제품을 선보였을 뿐 아니라 어떤 것은 계획상의 모든 기대치를 능가하는 성능을 보이기도 하였다. 연간 약 2천만 대에 달하는 전세계 자동차 판매증가에 비하여 아직은 수 천대에 불과하지만 조심스럽게 전기자동차의 상용화가 시도되고 있는 것은 더 이상 자동차들이 전기적으로 구동될 수 있는가 하는 문제가 아니라 언제부터 보편화되겠는가 하는 시간의 문제라는 것을 반증하는 것이다.

한편 자동차 산업은 국내의 경제에서도 큰 비중을 차지하고 있으며 따라서 국내의 자동차회사들도 전기자동차의 개발에 적극적으로 참여하고 있다. 그러나 실제로 전기자동차가 어느 정도 우리에게 가까이 다가와 있는 것인지에 대하여 실감하기 어렵다.

이에 본고에서는 전기자동차의 실용화와 관련된 최근의 개발 성과 및 추세에 대하여 문헌을 통하여 보고된 바를 소개하고자 한다.

먼저, 일본의 Toyota사는 현재 매년 20,000대의 하이브리드 전기자동차를 미국, 캐나다 및 유럽시장에 대

당 \$18,000로 2000년까지 공급할 계획을 하고 있는데 이 회사의 Prius에 주목하고 그 개발 성과를 소개하고자 한다. 이는 미국시장의 약 3분의 2를 차지하는 성과이다. 다음으로 전기자동차의 개발과 상업적인 응용에 있어 가장 큰 걸림돌이 되고 있는 축전지 분야에 있어서의 연구개발 동향과 그 중 가장 높은 기대를 받고 있는 NiMH 축전지의 개발성과를 소개하고자 한다.

2. 전기자동차와 축전지

전기자동차에 있어 축전지 기술의 중요성은 에너지 밀도가 잘 보여주고 있다. 44MJ/kg 즉, 대략 12kWh/kg의 에너지밀도를 갖는 가솔린에 비하여, 가장 보편적인 연축전지의 경우 에너지밀도는 30Wh/kg으로서 가솔린의 400분의 1이다. 엔진의 낮은 연소효율을 감안하더라도 비교가 되지 않는다. 이런 이유로 사람들은 전기자동차에 사용되는 축전지의 에너지밀도에 대하여 관심을 기울일 수밖에 없고 사실 전기자동차에 관련된 모든 기술개발 중 유일한 장벽이라 해도 과언이 아니다.

최근까지 대부분의 전기자동차에서는 연축전지(Lead Acid Battery)에 의하여 구동되어 왔고, 이것은 거의 100년 이상 발전되어 왔지만 전기자동차에서는 주행거리는 150km 이하로 제한되어 왔다. 그렇지만 연축전지에 대한 기술의 매력은 이것이 광범위하게 사용되고 있

고 가격이 낮다는 데 있다.

연축전지에 비하여 더 높은 에너지밀도를 가지는 NiFe, NiCd, NiMH 및 Fuel Cell 축전지 등 많은 형태의 축전지들이 개발되기도 하고 전기자동차에 응용되어 왔으나, 축전지에 관련된 문제들은 에너지밀도 외에도 출력밀도, 반복충전수명, 충전시간, 온도, 독성물의 발생이나 안정성 등의 기술적 문제와 경제성에 관련된 문제를 가지고 있다. 이러한 문제는 결국 여러 가지 조건의 조합에 의한 최적화의 문제로 귀결되며, 실제 전기자동차를 제작하기 위해서는 그러한 요구사항들의 적절한 조합에 대한 신중한 검토가 필요하다.

축전지와 자동차의 설계과정은 필수적으로 서로 연관되어 있으며 축전지의 성능에 의해 결정된다.

한편 기존의 자동차용 축전지와 전기자동차용 축전지의 주요 차이점을 보면 전자의 연축전지의 제조기술은 많은 최적화가 이루어져 왔고 중요한 전기화학적 성분(납과 황산)들의 가격이 저렴하다는 점이며, 후자의 전기자동차용 축전지들은 전 수명에 걸쳐 수백 회 동안 완전히 충전이 이루어질 수 있어야 한다는 점이 추가된다.

표 1은 전기자동차와 하이브리드 전기자동차에 요구되는 기본적인 축전지 성능의 목표치들을 보여주고 있다. 이 표에서와 같이 각각의 경우에 요구되는 축전지의 성능에는 차이가 있다. 즉 탑재상태에서 충전되는 하이브리드 전기자동차의 경우 에너지밀도보다는 출력밀도가

〈표 1〉 전기자동차와 하이브리드자동차용 축전지의 표준치

Typical goals for batteries for electric and hybrid electric vehicles			
Parameter	Batteries for:		Typical lead-acid battery
	electric vehicles	hybrid vehicles	
Specific energy, Wh/kg	80~200	8~80	25~35
Energy density, Wh/L	135~300	9~100	~70
Specific power, W/kg	75~200	625~1600	80~100
Life expectancy, cycles (year)	600~1000 (5~10)	103~105 (5~10)	200~400 (2~5)
Cost, US \$/kWh	100~150	170~1000	~100

높은 것이 요구되는 점 등이다.

3. 하이브리드 전기자동차

전기만으로 구동하는 전기자동차와는 별도로 가솔린 엔진과 전기 모터를 같이 사용하는 하이브리드 전기자동차는 전기자동차와 가솔린 자동차의 장점만을 결합시킨 형태로 높은 실용성이 예견되어 왔다. 왜냐 하면 연료효율을 개선한다는 것 자체가 연료의 축전지 기술의 중요성으로 말미암아 결국 기업체들과 정부의 콘소시엄 프로그램이 이루어졌고 이를 통하여 축전지의 기술개발에 큰 진전을 가져 왔으며 또한 표준화도 진행중이다.

경제성에 대한 소비자의 기대를 충족시키면서도 배기가스를 줄이는 역할을 하기 때문이다. 그 실용성을 실제로 입증하는 것으로써 현재 실용화가 가장 앞선 일본의 Toyota사의 하이브리드 전기자동차 모델인 Prius에 대하여 소개하고자 한다.

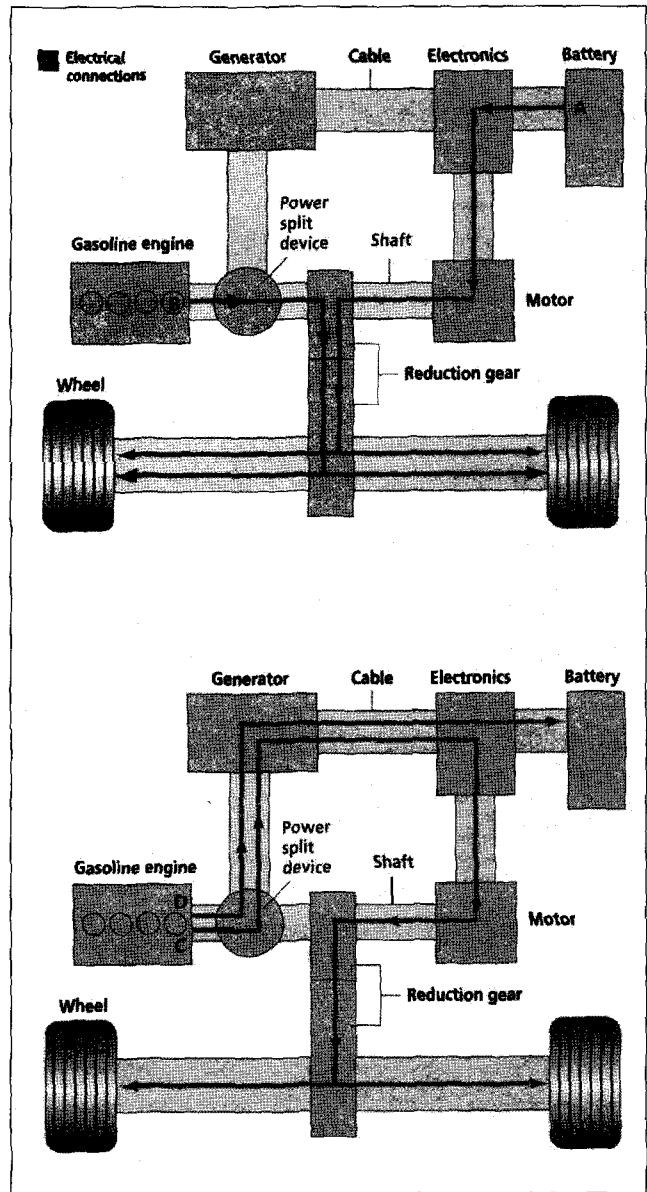
Prius는 일본에서는 혼잡한 도로에서 심한 제동을 하는 주행상태의 주행시험을 통하여 기존의 가솔린 차량에 비하여 연비는 두 배(3.57L/100km)이면서 배기량은 일본 규정의 10분의 1에 불과한 결과를 얻었다.

한편, 대부분의 하이브리드 자동차는 가솔린 엔진과 축전지/전동기로부터 추진력을 따로따로(직렬) 얻기도 하고 동시에(병렬) 얻기도 한다. 그러나 개선된 하이브리드 자동차인 Prius에서는 엔진에 의하여 구동되는 별도의 발전기를 통하여 축전지를 충전하거나 모터에 전원을 공급(직렬 동작)할 뿐만 아니라, 차량을 운전하기 위하여 엔진과 전동력을 같이 사용(병렬 운전)하기도 한다.

그리하여 Prius는 다른 전기자동차처럼 충전소와 같은 별도의 외부장치로부터 축전지를 충전할 필요가 없으며, 기존의 가솔린 엔진차량과 같은 가속력을 지니고 있게 하였다.

또한 차가 멈추거나 낮은 부하에서는 자동으로 가솔린 엔진을 끄고 축전지의 전원으로 운전(직렬 운전)하고,

동시에 회생제동에 의하여 축전지에 충전함으로써 에너지를 절감하는 특성을 갖게 하였다. 그리하여 저속주행 상태에서 50리터 가솔린 연료로 약 1400km 를 주행할 수 있었다(비공식적인 측정에서 미국 운전 사이클에서는 1050km).



〈그림 1〉 하이브리드 전기자동차의 전력선도

도요다 하이브리드시스템(THS)으로 불리는 전체 시스템은 효율과 주행속도 등을 종합적으로 잘 관리하고 있다. 즉, 각 주행속도에서는 적절한 직렬/병렬 운전으로 조절할 수 있게 함으로써 엔진 및 전동기를 모두 최대 가속력을 갖게 할 필요가 없기 때문에 저출력-고효율 엔진과 전동기만으로 운전자가 기대하는 성능에 부응할 수 있다. 게다가 변속장치 설계는 최대 효율 영역에서 엔진의 동작을 최적화시키고 있다.

가) 차량의 동작과정

Prius 차량의 동작과정을 그림 1에서 보는 바와 같은 에너지 흐름도에서 설명하면 다음과 같다.

- ① 가솔린 엔진은 가장 효율이 높은 범위(7kW 이상)에서만 동작하도록 한다. 그래서 차량이 정지상태에서 스타트할 때나 서행할 때는 엔진은 꺼진 상태에서 전동기만 축전지로부터 전력을 받아 바퀴를 구동(A)한다.
- ② 정상적인 운전상태에서는 엔진 출력은 동력분배기(Power Split Device)에서 바퀴(B)와 발전기로 분배되며 발전기는 전력을 모터(C)나 축전지(D)에 각각 공급한다. 엔진속도는 차량속도와 별도로 단순히 발전기 속도를 변화시킴으로써 조절될 수 있다.
- ③ 엔진을 기동하기 위해서는 발전기 속도가 전기적으로 증가되어 엔진 속도가 증가되었을 때 연료와 스파크를 더하면 연소를 일으키기 시작하고 전원이 생산된다. 이는 어떤 차량속도에서도 가능하게 한다.
- ④ 급가속 혹은 중부하에서는 차량은 엔진출력 외 축전지/전동기로부터 출력을 증가시킨다(B+A). 감속이나 제동시에는 모터가 발전작용을 하여 바퀴로부터의 운동에너지를 전기로 변화시켜 배터리에 충전시킨다(A Inverse).

⑤ 컴퓨터제어 충전시스템(Electronics)은 배터리에 충전이 일정하도록 유지시킨다(D). 역방향 기어가 없기 때문에 차량후진은 전동기에 의해서만 이루어진다.

⑥ 가솔린 엔진과 축전지/전동기의 하이브리드 작용의 요체는 그림 2에서 보는 바와 같이 트랜스미션에서 엔진 출력을 분배하는 동력분배 기어장치(Power Split Device)이다.

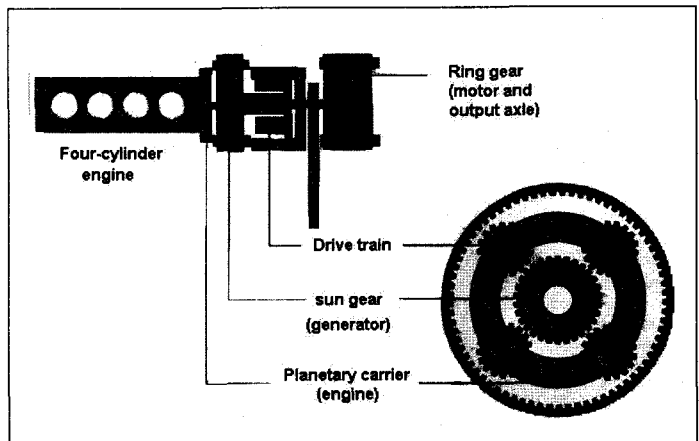
여기서, 엔진은 Planetary Carrier에 연결되고 발전기는 Sun Gear에 연결되어 있다. 발전기의 부하를 변화시키면 엔진의 속도가 조정되어 최적치에서 작동한다. 동시에 발전기는 엔진의 기동모터로 작용한다.

구동전동기는 Ring Gear에 연결되어 구동력을 갖거나 제동시 회생발전작용을 한다.

나) 차량의 각 요소의 정격

Prius 차량의 엔진은 Atkinson 연소사이클을 사용한 새로 개발된 1.5리터 가솔린 엔진이다.

대부분의 차량은 동일한 압축/팽창비를 갖는 스파크 점화 연소과정을 갖는 Otto 사이클인데 비하여 Atkinson 사이클은 압축/팽창비가 다른 고폭창 사이클로서 특유출력은 작지만 열효율이 높아 하이브리드 장치에 적합하다.



〈그림 2〉 동력분배 기어장치

엔진의 최대속도는 설계상 4000rpm으로 제한하고, 최대 출력은 43kW이며, 최대 열효율은 약 38퍼센트이다.

발전기의 정격출력은 15kW이고 최대속도는 5,500 rpm이며, 모터의 정격출력은 30kW이고 최대속도는 6,000rpm이다. 시스템 전압은 288V이고 축전기는 NiMH 축전기로서 팩의 정격은 6.5Ah이지만 설계상 정상동작에서의 에너지저장은 약 1kWh이다.

결과적으로 이 하이브리드 전기자동차의 에너지효율은 다음 사항에 의하여 제고된다.

첫째, 회생제동은 차량의 운동에너지의 일부를 축전지로 환원시킨다. 즉, 시스템의 구동이 지연될 때의 잉여에너지는 쉽게 회수된다.

둘째, 정지시나 저전력 운전(7kW 이하)시에 엔진이 꺼진다는 사실은 도시주행에서 평균효율을 높여준다. 이것은 전반적인 효율을 약 40%까지 개선시킨다.

셋째, 낮은 마찰의 엔진 설계와 차량 속도에 관계없이 독립적으로 엔진속도를 제어하는 능력을 결합한 Atkinson 사이클의 적용으로 전반적 효율을 40% 더 개선시킨다.

세 가지 모두 정지와 서행이 잦은 도심 운행시 효율 개선의 효과가 보다 크지만 고속에서도 상당한 효과가 따른다.

4. NiMH(Nickel-Metal Hydride) 축전지

현재 여러 가지 조건을 조화시킬 수 있는 가장 바람직한 전기자동차용 축전지는 NiMH(니켈-금속-수소화합) 축전지이다(그림 3 참조).

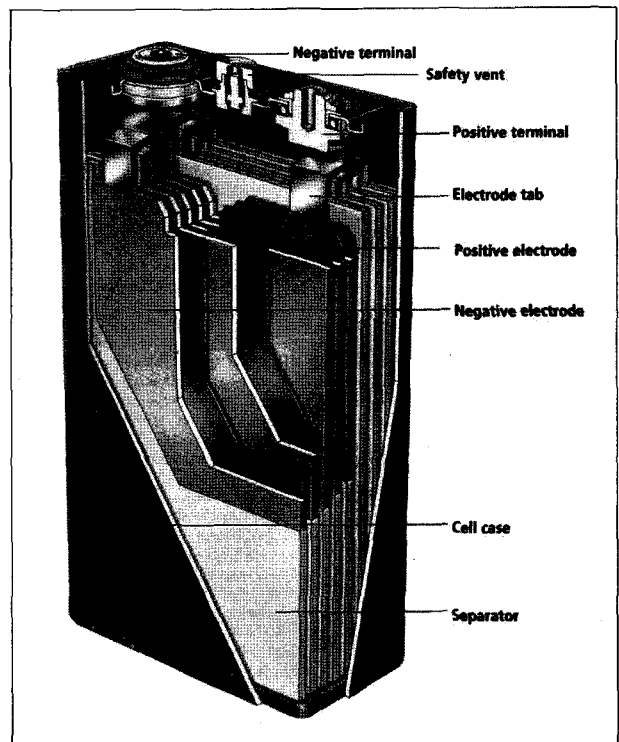
Honda의 Plus나 Toyota의 RAV-4EV 등과 같이 주요 자동차 메이커들이 그들의 전기자동차에 대한 NiMH의 사용에 망설이지 않고 있다. General Motors의 Chevrolet S-10(Electric Pickup Truck)이 그러하고 Chrysler와 Ford 역시 같은 계획을 발표했다.

우선 NiMH 축전지는 짧은 시간에 높은 비율로 충·

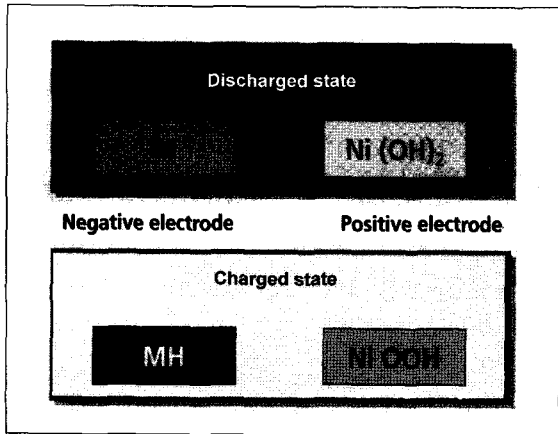
방전되는 우수한 출력특성 때문에 하이브리드 전기자동차(HEV)에 매우 적합하며, 이미 최초로 양산되어 시판되고 있는 Toyota의 하이브리드 전기자동차인 Prius에도 사용되고 있다.

NiMH 축전지가 Nickel-cadmium과 같은 초기의 축전지들과 다른 점은 기본적인 Nickel-metal Hydride 기술에 근거를 두고 있다는데 있다. 우선 수소는 액체 수산화물의 체적밀도와 비교해서 매우 높은 체적밀도에서 금속수산화물 합금들에 저장될 수 있으며 이것은 금속수산화(Metal-hydroxide) 축전지의 높은 에너지밀도를 만들어 낸다. NiMH 셀에서 니켈 수산화물 양의 전극은 금속-수소화물(Metal-hydride)의 음의 전극과 결합되어 있다(그림 4 참조).

후자의 경우 금속-수소화물합금(Metal Hydride Alloy)은 도통기층(Conducting Substrate)으로 꼭



〈그림 3〉 NiMH 축전지의 구조



〈그림 4〉 NiMH 셀의 충전작용

채워져 있다. 양 전극의 니켈수산화물은 니켈기포기층 (Nickel Foam Substrate) 속으로 채워진다.

충전 동안 수소는 전해질과 반응하여 생성되며 음의 전극에서 금속합금에 저장된다. 양의 전극에서 수소 이온(ion)은 니켈 수산화물의 브루사이트구조(Brucite Structure) 속으로 더 높은 원자가로 산화되는 동안 추출된다. 두 반응은 완전히 상반된 현상으로 나타난다. NiMH 축전지의 또 다른 장점은 사용에 있어 포용성을 보여 준다는 것인데 다른 축전지의 경우 과충전되거나 과방전이 일어나는 경우 축전지를 손상시키거나 안전에 대한 문제를 야기하게 되지만 NiMH 축전지의 경우 과충전 및 과방전시에는 양극에서 산소 혹은 수소를 발생시켜 이들이 음극에서 쉽게 재결합되어 화학작용이 발생하지 않는 것이다.

이러한 포용성이 높은 전압을 사용하는 전기자동차에 의 적용에 있어 실제적인 큰 장점이 된다. 높은 전압의 생성을 위하여 직렬로 연결된 많은 셀들은 항상 같은 상태로 충전되지 않을 것이고 결과적으로 정상적인 동작중에 몇몇의 셀들이 과충전 혹은 과방전 상태가 될 수 있기 때문이다.

앞서 설명한 바와 같이 전기자동차에서 요구되는 축전지의 성능은 많다. 높은 에너지 및 출력밀도 외에 넓은

〈표 2〉 NiMH 축전지의 성능규격

1. Batteries for electric and hybrid electric vehicles			
Characteristic	Units	13-EV-90	12-HEV-20
Weight	kg	18	5.2
Volume	L	7.1	2.3
Nominal voltage	V	13.2	12.0
Rated capacity	Ah	90	20
Specific energy	Wh/kg	70	50
Energy density	Wh/L	170	110
Specific power	W/kg	200	550
Power density	W/L	485	1300

사용온도범위와 긴 수명, 그리고 전기적 과부하에 대한 내구성, 무보수 운전과 안전성이 요구된다. 그리고 무엇보다도 수용할 수 있는 가격에 제작되어야 한다. 비록 많은 축전지들이 전기자동차용으로 개발되었지만, NiMH 축전지만큼 이러한 요구를 잘 충족시킬 만한 것은 없다. 또한 성능의 향상은 지금도 계속되고 있으며 사실상 중간단계의 성능 목표치를 이미 능가했다. 표 2에서 이 축전지의 몇몇 중요한 특성들을 보여주고 있으며 앞으로 더 뛰어난 제품들이 선보일 것이다.

기술 수준과 생산량이 증가함에 따라 이 축전지는 보다 저렴해질 것이고 궁극적으로는 전기자동차가 가솔린 자동차보다 더 저렴해질 것이라고 말하는 관계자가 있을 정도이다.

5. 맺음말

우리 나라의 경우도 특히 대도시를 중심으로 이미 오래 전부터 매연 문제가 심각한 상황이다. 또한 자동차 산업은 국내 경제의 큰 축을 이루고 있을 뿐 아니라 세계시장에서 차지하는 비중도 크다. 이제 공해문제를 적극적으로 해결할 수 있는 자동차회사만이 살아 남는 시기가 곧 닥칠 것을 예상한다는 것은 어렵지 않은 일이며 국내에서도 서둘러 적극적으로 개척해야 할 분야로 믿어지고 있다.