

리튬이온 전지를 이용한 6인승 전기자동차의 설계

6 조: 이승은 · 심병윤 · 신하은 · 정진희

전남대학교 정밀화학과
500-757 광주광역시 북구 용봉동 300
(2014년 6월 13일 제출)

Design of six-seater electric car by using lithium-ion batteries

Team 6: Lee · Sim · Shin · Jeong

Department of Chemical Engineering, Chonnam National University
77 Yongbong-ro, Buk-gu, Gwangju 500-757
(Submitted 13 June 2014)

요 약

이 프로젝트의 목적은 리튬이온 전지를 이용한 6인승 전기자동차를 설계하는 것이다. 구체적으로는 배터리만으로 시판중인 6인승 차량과 비슷한 수준 구동력을 내는 것을 목표로하였다. 전극 재료로는 애노드는 높은 출력, 지속력, 낮은 작동 온도 그리고 안정성에서 우위를 보이는 Lithium titanium oxide, 캐소드로는 Lithium manganese oxide를 이용하였다. 애노드로 사용한 LTO는 흑연을 대체하기 위한 물질로, 기존 전극에 비해 빠르게 충방전이 가능하다는 장점이 있다. 특히, LIB의 구동력인 리튬이온의 장벽으로 작용하는 SEI(Solid Electrolyte Interface)를 생성하지 않는다는 것이 큰 장점이다. LMO를 캐소드로 사용할 경우 효율이 높고 가격 면에서 우위를 가진다. 이는 LMO의 3차원 결정 구조상 넓은 표면적에 의해 더 많은 이온을 수용할 수 있기 때문이다. 전해질로는 EC(Ethylene carbonate), DMC(Dimethyl carbonate), EMC(Ethyl-methylcarbonate)가 1:1:1의 부피비로 구성된 용액에 1 M의 LiPF_6 (Lithium hexafluorophosphate, Panaxetec) 염이 용해된 것을 사용하였다. 배터리 수납 문제를 해결하기 위하여 차체 하부에 넓게 설치하는 모델을 선택 하였다. 차량 하부에 설치되어 배터리가 무게중심을 낮추어 안정적인 주행 및 전복사고 등 안전사고에도 효과를 볼 수 있을 것으로 생각된다.

1. 목표

소형전지 중심의 이차 전지에서 중대형 전지로 확대시켜, 석유가 아닌 좀 더 친환경 적인 전기를 이용해 6인승 자동차를 구동 설계한다. 구체적으로는 시판중인 6인승 차량과 비슷한 수준의 차량을 선정하여, 차량에 탑승자들이 탑승한 것을 가정한다. 그 상태에서 전기에너지만으로 기존 차량만큼의 구동력을 내는 것을 목표로하였다. 기존 차량의 간단한 제원은 다음과 같다. “H”사 “M”모델 6인승, 무게 1,840 kg, 엔진 출력 200ps = 147.1 kW.

2. 필요성

20세기 후반에 들면서 환경에 대한 중요성이 재인식되면서 다시 전기자동차에 대한 관심이 높아지기 시작하였다. 환경문제에 대처하는 자동차를 찾기 시작한 것은 약 30년 전부터이다. 현재로는 전기에너지를 사용하기 때문에 에너지를 다양화할 수 있고, 2040년이면 석유자원이 고갈되리라는 석유 수급 불균형에 대처할 수 있다는 점, 가솔린 자동차가 전체 에너지 효율이 10.3%인데 비해 전기자동차는 17.8%까지 에너지 효율을 높일 수 있다는 점, 대기 오염에 대한 규제 강화로 무공해 차량의 의무적인 판매에 대응한다는 점 등 여러 가지 이유로 인하여 전기자동차의 필요성이 더욱 증가하고 있다.

특히 일본의 Yano 경제연구소에 따르면 2011년도 차량탑재용 리튬이온 이차전지 세계 시장규모는 1,000억 엔에서 2015년에는 1조 엔 가까이 성장할 것으로 예측되어 발 빠른 대응으로 국가 경쟁력을 갖추어야 할 것이라 전망된다.

이 프로젝트에서는 순수하게 전력만을 이용한 전기자동차의 설계를 목표로 하고 있다.

3. 내용

가. 구동 시스템

전기 자동차는 전지로 모터를 가동하여 차량을 구동시키고, 감속할 때는 모터를 발전기, 회생브레이크 장치로 사용하여 운동에너지를 전기에너지로 변환하여 배터리에 저장하고 있다. 전기 자동차의 구성 요소는 전지, 전동기와 제어장치, ECU(Electronic Control Unit) 장치로 나눌 수 있다. 이들 중 우리는 전기화학 강의를 수강하면서 습득한 지식을 이용하여 전기자동차에 이용 가능한 전지를 설계하는 것을 중점적으로 다룰 것이다.

현재 리튬이온배터리(Lithium ion battery, 이하 LIB)에 많이 쓰이는 애노드 물질은 흑연, 캐소드 물질은 코발트계열이다. 흑연의 경우 용량이 크다는 장점이 있지만, 안정화시키는 비용이 많이 들고 높은 작동 온도를 요구한다는 단점이 있다. 이에 근거하여 이번 프로젝트에서는 높은 출력, 지속력, 낮은 작동 온도 그리고 안정성에서 우위를 보이는 Lithium titanium oxide(이하 LTO)를 애노드로, Lithium manganese oxide(이하 LMO)를 캐소드로 가지는 배터리를 이용한다.

나. 메커니즘

리튬이온 전지의 기본적인 메커니즘은, 상이한 재료 간에 전위가 서로 다름으로 인하여 전위차가 발생하는 것에 기인한다. 전위차로 인해 전자이동현상이 발생하는 것이다. 이를 이용하는 것이 전지의 기본원리이다. 리튬이온전지는 전기화학적으로 리튬을 삽입할 수 있는 캐소드 및 애노드 재료와 리튬이온을 이송할 수 있는 매질로써 비양성자성극성 유기용매를 사용한다.

전극반응에서의 메커니즘은 다음과 같다. 먼저 애노드에서는 Ti_5O_{12} 가 xLi^+ , 그리고 x 개의 전자와 결합하여 $Li_{4+x}Ti_5O_{12}$ 가 형성된다. 캐소드에서는 $LiMn_2O_4$ 가 환원되어 $Li_{1-x}Mn_2O_4$ 와 xLi^+ 로 나누어지고, x 개의 전자를 방출한다. 전체 반응을 포함식은 다음과 같다.

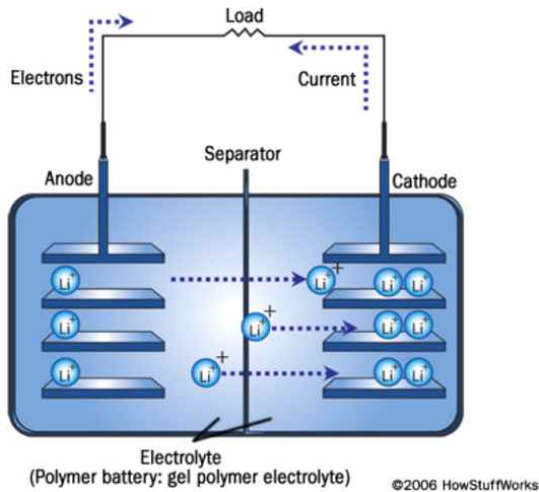
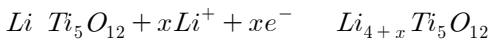


그림 1. 리튬이온 배터리의 메커니즘

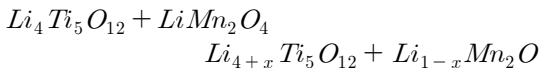
ode :



Cathode :



Overall :



애노드: LTO는 흑연을 대체하기 위한 물질로 이론적 전지 전압(cell voltage)은 2.4 V이다. 기존 전극에 비해 빠르게 충방전이 가능하다는 장점이 있고 특히, LIB의 구동력인 리튬이온의 장벽으로 작용하는 SEI(Solid Electrolyte Interface)를 생성하지 않는다는 것이 큰 장점이다. LTO의 에너지 밀도 및 출력 밀도 계산은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{량}(Q) &= \frac{w}{M} nF \\ &= \frac{\text{mol}}{459.1\text{g}} \frac{1}{1} \frac{96485\text{C}}{\text{mol}} \frac{\text{hr}}{3600\text{s}} \frac{1000\text{mA}}{\text{A}} \\ &= 175.13\text{mAh/g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{에너지 밀도} &= Q \times E_{wk} (2.4\text{V}) \\ &= \frac{175.13\text{mAh}}{\text{g}} \frac{2.4\text{V}}{1} \frac{1\text{A}}{1000\text{mA}} \frac{1000\text{g}}{1\text{kg}} \\ &= 420.31\text{Wh/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{출력 밀도} &= i \times E_{wk} \\ &= \frac{Q}{t} \times E_{wk} \\ &= \frac{175.13\text{mAh}}{\text{g}} \frac{1}{2\text{hr}} \frac{2.4\text{V}}{1} \frac{1000\text{g}}{1\text{kg}} \frac{\text{A}}{1000\text{mA}} \\ &= 210.16\text{W/kg} \end{aligned}$$

캐소드: 코발트 계열의 캐소드 대신 LMO를 사용할 경우 효율이 높고 가격 면에서 우위를 가진다. 이는 LMO의 3차원 결정 구조상 넓은 표면적에 의해 더 많은 이온을 수용할 수 있기 때문이다. 에너지 밀도가 낮다는 단점이 있지만, 수명이 길고 안정성에서 비교우위를 가진다. LMO의 에너지 밀도 및 출력 밀도 계산은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{용량}(Q) &= \frac{w}{M} nF \\ &= \frac{\text{mol}}{125.8\text{g}} \frac{1}{1} \frac{96485\text{C}}{\text{mol}} \frac{\text{hr}}{3600\text{s}} \frac{1000\text{mA}}{\text{A}} \\ &= 213\text{mAh/g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{에너지 밀도} &= Q \times E_{wk} (3.8\text{V}) \\ &= \frac{213\text{mAh}}{\text{g}} \frac{3.8\text{V}}{1} \frac{1\text{A}}{1000\text{mA}} \frac{1000\text{g}}{1\text{kg}} \\ &= 809.4\text{Wh/kg} \end{aligned}$$

표 1. 리튬 이온전지에 사용되는 유기 용매의 물리화학적 성질

solvent	Dielectric constant (ε)	Viscosity (η/cP)	Freezing point (°C)	Boiling point (°C)
Ethylene carbonate(EC)	95.3	1.9	36.4	238
Prorylene carbonate(PC)	64.9	2.5	-54.5	242
Dimethyl carbonate(DMC)	3.12	0.59	3.0	90
Diethyl carbonate(DEC)	2.82	0.75	-43.0	127
Dimethoxy ethane(DME)	7.05	0.46	-58.0	85

$$\begin{aligned} \text{력밀도 } i \times k &= \frac{Q}{t} \times E_{wk} \\ &= \frac{213mAh}{g} \frac{1}{2hr} \frac{3.8V}{1} \frac{1000g}{1kg} \\ &= 404.7 W/kg \end{aligned}$$

위의 이론적 계산에서 $E_{wk} = 3.8 V$ 를 이용했지만, 실제 사용되어지는 전극에서 측정된 값은 이론값보다 적은 3.0 V였다. 따라서 LMO를 이용한 캐소드의 효율은 약 78.9%이며, 실제 사용 가능한 출력 밀도는 319.5 W/kg이 된다.

전해질: 유기 전해액은 EC(Ethylene carbonate), DMC(Dimethyl carbonate), EMC(Ethyl-methyl-carbonate)가 1:1:1의 부피비로 구성된 용액에 1 M의 $LiPF_6$ (Lithium hexafluorophosphate, Panax-etec) 염이 용해된 것을 사용하였다

유전상수가 높은 값을 가지면 극성 역시 증가하기 때문에 높은 효율을 보일 수 있으나, 유전상수가 높아지면 점도 역시 증가하게 된다. 따라서 한 용매만을 사용하기 보다는 유전상수가 크고 점도가 낮은 용매를 혼합하여 전해질로 사용한다.

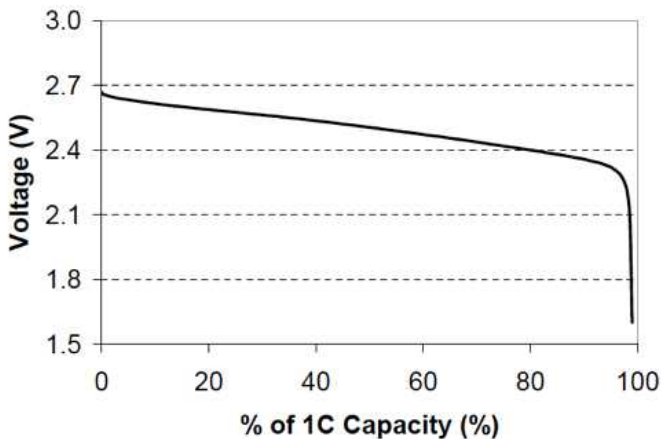


그림 2. 전지 작동 전극에 따른 전압의 변화

다. 구동 소요 동력

구동 소요 동력은 차량의 무게와 탑승자 6인의 무게를 더한 것을 기준으로 잡았다. 목표 차량의 공개된 무게는 1,840 kg 이다. 탑승자는 1인 당 75 kg으로 계산했으며, 이는 RCAR(Research Council for

Automobile Repairs)에서 자동차 충돌실험에 사용하는 더미의 표준 무게에서 근거했다. 즉, 전체 무게는 $1,840 kg + (75 kg * 6) = 2,290 kg$ 가 되었다. 속도의 기준은 위의 무게를 10초 이내에 정지상태에서 시속 100 km로 구동시키는 것을 목표로하였다. 다음 식을 통해 동력 소요를 계산하였다.

$$\begin{aligned} P &= E/s = \frac{1}{2} mv^2/s \\ &= \frac{1}{2} \frac{2290 kg}{1} \left(\frac{100 km}{1 hr} \frac{1 hr}{3600 s} \frac{1000 m}{1 km} \right)^2 \frac{1}{10 s} \\ &= 88348.77 W \end{aligned}$$

최종적으로 88.3 kW가 구동에 소요될 것으로 예상되었다. 이는 기준 차량의 구동력인 200ps = 147.1 kW에는 미치지 못 하지만, 자동차의 일반적인 운행에 부족함이 없는 수준이라 판단된다.

라. 스택 설계

Fathabadi et al.⁹⁾에 따라 가로, 세로, 높이가 각 $16cm \times 23cm \times 0.8cm$ 인 단위 셀을 선택하였다. 이에 따르면 위의 단위 셀 20개를 한 모듈(pack)으로 사용한다.

애노드를 기준한 단위 셀의 용량은 $Li_4Ti_5O_{12}$ (LTO)의 밀도인 3.73 g/ml을 이용하여 계산하였다.

$$\begin{aligned} E &= \frac{175.13mAh}{g} \frac{3.73g}{ml} \frac{1ml}{1cm^3} \frac{(16 \times 23 \times 0.8)cm^3}{1} \\ &= 192312.4mAh \end{aligned}$$

단위 셀의 출력은 다음과 같이 계산하였다.

$$\begin{aligned} P &= \frac{210.16 W}{kg} \frac{3.73g}{ml} \frac{1ml}{1cm^3} \frac{1kg}{1000g} \frac{(16 \times 23 \times 0.8)cm^3}{1} \\ &= 230.8 W \end{aligned}$$

1 pack (20 cells) 출력

$$P = 230.8 W/cell \times 20 (cell/pack) = 4616 W/pack$$

$$\text{필요한 모듈의 개수는 } \frac{88348.77 W}{4616 W/pack} = 19.1 pack$$

로, 약 20팩으로 계산되었다.

구동소요 동력 88348.77 W의 출력을 내기 위해서는 단순 계산으로 117.7 리터 이상의 배터리가 필요하다.

마. 차량 설계

배터리의 총 크기는 일차적으로 기준 차량의 연료 탱크 용량(71리터)을 넘지 않는 부피를 목표로 했으나 스택 설계의 계산을 통해 알 수 있듯이 목표한 부피보다 다소 큰 공간이 필요하다. 따라서 상용 차량의 연료탱크를 배터리 수납공간으로 개조하여 사용한다는 식의 발상은 의미 없는 것이 되었다.

배터리 71리터를 제외한 47리터의 배터리 수납을 해결하기 위하여 차체 하부에 넓게 설치하는 모델을 선택 하였다. 미국의 전기자동차 개발 및 판매업체 테슬라의 전기자동차 모델 S는 전복 시험에서 최고 수준인 S등급을 받았다. 이는 배터리팩(85 kWh)이 전체 중량 2.1톤의 약 30%를 차지하고 있음에도 불구하고 차량 하부에 설치되어 낮은 무게중심 덕택에 놀라울 정도로 훌륭한 코너링을 자랑하기 때문이다. 여분의 배터리 47리터를 차체 하부에 넓게 설치할 경우 그 무게는 단순 계산으로 약 175.3 kg 이 되며, 목표 차량의 무게 1,840 kg의 10%에 해당한다. 차체 하부에 여분 배터리를 설치할 경우 차량의 탑승, 수납공간을 보다 넓게 사용할 수 있으며 낮은 무게중심에 의해 안정적인 주행 및 전복사고 등 안전사고에도 효과를 볼 수 있을 것으로 생각된다.

바. 차량 운행

시간 및 경제적인 여건의 제약으로 인하여 시제품은 제작하지 못 하였다. 그러나 실제 차량 운행 시 나타날 수 있는 사항들을 예상하여 보면, 가장 큰 문제로 배터리의 안전한 적재 문제를 꼽을 수 있을 것이다. 부피에 대한 문제는 차량 설계 부분에서 해결된 부분이고, 배터리 출력 역시 자동차를 구동하기에 문제없어 보이지만, 차량 밑바닥에 배터리를 깔아놓고 사용하는 것은 배터리에 가해지는 압력과 열 방출 문제를 새롭게 야기한다. 리튬이온 배터리에 열을

가하거나 압력을 가했을 때, 폭발이나 발화의 위험성이 있다는 것은 이미 잘 알려진 사실이다. 몇 년 전 배터리를 차량 하부에 적재한 전기자동차를 상용화한 테슬라 사 역시 이 문제를 해결하기 위해 새로운 배터리 냉각 시스템과 안전장치들을 도입했음에도 불구하고 몇 건의 화재 사건으로 인해 곤혹을 치룬 바 있다. 이런 문제점들은 전기자동차의 대중화를 가로막는 큰 문제점들이며, 장기적으로 지속적인 투자와 연구를 통해 해결해 나가야 할 것이다.

4. 결론

전기자동차는 현재의 내연기관 차량을 대체하여 화석연료의 고갈에 대비하고 온실가스 방출량 감소에 기여할 뿐만 아니라 내연기관 차량에 비해 높은 에너지 효율을 가질 수 있다. 그러나 전기자동차는 높은 제조원가와 구조기술의 미비로 인해 본격적인 상용화가 되지 않는 못한 실정이다. 전기자동차 제조원가에서 큰 비중을 차지하는 것은 전지 팩의 가격이다. 전기자동차의 2차전지로 사용되는 LIB 팩의 경우 그 가격의 절반이 셀 가격이고 나머지 절반은 그 셀들을 모아 팩으로 가공하는 포장비용이다. 따라서 전지 팩의 원가를 셀 수준에서 줄일 수 있다면 결과적으로 자동차의 가격을 크게 감소시킬 수 있다. 자동차용 LIB는 휴대용 전자기기에 사용되는 중소형 LIB보다 훨씬 더 큰 비에너지, 비출력, 수명, 안전성을 요구한다.

이러한 LIB의 성능은 그 구성요소들인 캐소드 재료, 애노드 재료, 전해액 등의 조합 방법에 의해 크게 달라진다. 비에너지와 비출력은 각각 주행거리와 가속능력을 결정하므로 자동차 성능의 척도가 된다. 수명은 자동차의 가격과 밀접한 관계가 있으며, 10년 이상을 보장할 수 있어야 내연기관과 경쟁이 가능할 것이다. 안전성은 탑승자의 생명과 관계가 있으므로 무엇보다 우선적으로 고려되어야 한다.

이번에 구상한 LIB는 출력, 지속력, 낮은 작동 온도 그리고 안정성에서 우위를 보이는 LTO와 LMO를 이용하여 설계하였다. 전해질은 유전상수가 크고 점도가 낮은 용매를 혼합하여 사용했다. 하지만 단위셀

출력이 낮은 탓에 기존 차량의 연료탱크보다 큰 용량이 필요했다.

LIB의 가격을 낮추면서 성능을 향상시키는 것은 쉬운 일이 아니므로 앞으로 많은 R&D 노력이 필요하다. 다행히 LIB는 아직 완성된 기술이 아니므로 개선의 여지가 많이 남아 있어 앞으로 훌륭한 성능의 전지가 출현할 것으로 기대된다. 또 셀 가격의 상당 부분을 차지하는 분리막과 전해액 분야의 성능 개선도 LIB의 제조원가를 낮추는 데 크게 기여할 것이다.

5. 참고문헌

1. 고희신, 최정은, 이종대, “Core-shell 구조의 MCMB/Li4Ti5O12 합성물을 사용한 하이브리드 커패시터의 전기화학적 특성“, 충북대학교 화학공학과, 2013.9.
2. 심건주, “차량용 리튬이온전지 기술의 현황과 전망”, 한국과학기술정보연구원, 최근연구동향 제4권 제6호 2011.12.
3. 조만, “전기자동차용 리튬이온 이차전지의 생산기술”, 한국기계산업진흥회, 기계산업 426권 0호 78-83.
4. “미래형자동차 국제표준화 로드맵”, 자동차부품연구원, 2010.
5. "하이브리드 전기자동차용 고출력 리튬 이차전지", 한국과학기술정보연구원
6. RCAR, "RCAR Bumper Test", Issue 2.0, Sep.2010.
7. Types of Lithium-ion Batteries - Battery
8. Voelcker, John (September 2007). Lithium Batteries Take to the Road. IEEE Spectrum. Retrieved 15 June 2010.
9. H. Fathabadi. J. Power Sources 245 (2014) 495-500.