

경계조건을 반영한 하이브리드 자동차 배터리 모델링

이재중\*, 이준상\*, 배현주\*, 김미로\*\*, 권혁수\*\*, 나완수\*  
 성균관대학교\*, 현대모비스\*\*

Hybrid Vehicle Battery Modeling using Boundary Condition

Jae-Joong Lee\*, June-Sang Lee\*, Hyun-Ju Bae\*, Mi-Ro Kim\*\*, Hyck-Su Kweon\*\*, Wansoo Nah\*  
 SungKyunKwan University\*, Hyundai Mobis\*\*

**Abstract** - 고속/고전압으로 동작하는 자동차 전장품에 대한 EMI/EMC(Electromagnetic Interfere / Electromagnetic Compatibility) 문제는 기존의 PCB(Printed Circuit Board)에서의 문제와 다르며 하이브리드/전기 자동차에서 중요하게 다뤄지는 배터리에 대한 최적화 된 모델링 방법이 본 논문에 소개 되어있다. 기존의 단순한 저항과 커패시터의 연결로 표현 된 모델링이 아닌 고주파를 반영 할 수 있는 모델링 방법을 사용하였다. 이를 분석하기 위해 ANSYS사의 Simplorer와 Matlab을 사용해서 결과를 보았다. 본 논문에서는 DOD(Depth Of Discharge)에 따른 통합 등가회로 모델을 구현하면서 기존의 단순한 지수함수 곡선적합(Curve fitting)이 아닌 SOC(State Of Charge)의 경계조건을 반영하여 정확성을 높였다. 이로써 실험 데이터를 이용해 배터리 등가회로 모델링을 하여 정확한 배터리 동작의 해석을 할 수 있고 이에 따른 전도성 방사(CE : Conducted Emission)문제에 보다 쉽게 접근 할 수 있다.

1. 서 론

최근 하이브리드 자동차(HEV : Hybrid Electric Vehicle)에서 전장품에 대한 중요성이 강조된 시점에 이런 장치들의 EMI/EMC문제 개선이 요구되어지고 있다.

전기 자동차(EV : Electric Vehicle)은 엔진 등 내연기관이 없이 배터리에 충전된 전기 에너지만을 사용해 모터를 구동시키는 자동차이다. 저탄소 녹색성장이 강조되는 요즘 하이브리드 전기자동차와 전기자동차는 차세대 자동차로써 주목받고 있다. 특히 하이브리드 자동차에서 배터리는 가장 중요한 전장품 중의 하나이다. 하지만 이 중요 전장품인 배터리의 긴 충전시간, 짧은 수명, 무게, 그리고 가격 등과 같은 내부적 문제와 대중화 되지 않은 배터리 충전 시스템과 같은 외부적 문제로 인해 상용화되기에는 아직 어려움이 많이 있다. 이러한 어려움을 극복 하고자 국내/외에서 다양한 종류의 전기자동차가 개발과 세미나를 통해 기술 발전을 도모하고 있다.[1]

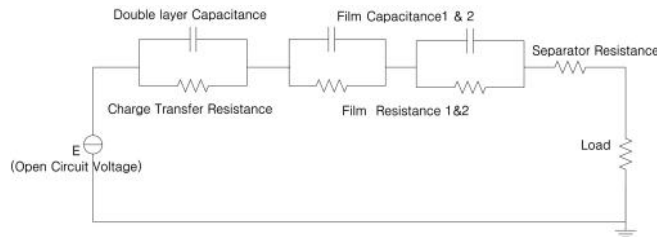
전기자동차의 전장품들이 고속/고전압으로 동작 할 때 생기는 전기적인 문제를 해결하기 위해서는 그 자동차 전장품의 최적화된 모델링이 필수적이다. 현재 일반적인 자동차의 EMC관련 주파수 대역은 30MHz에서부터 1GHz까지 였으나, 앞으로 차세대 자동차에 들어가는 전장품들은 1GHz이상의 주파수가 이용되기 때문에 이런 고주파수에 대한 신호 전달 특성 및 EMI문제에 관심을 가져야 한다.

본 논문에서는 중요한 전장품 중 하나인 배터리의 최적화된 모델링을 통해 시간 영역에서의 전압 변화와 주파수 영역에서의 R/C(Resistance/Capacitance)값들의 변화를 DOD에 따라 해석하였고 실제 측정값과 수식적으로 접근한 결과를 비교해 보았다.

2. 본 론

2.1 배터리 등가회로 모델링

배터리는 음극(Cathode)과 양극(Anode)이 있고 그 사이를 다공성 분리막(porous separator)이 분리 하고 있다. 양극과 음극은 저항과 커패시터의 병렬연결로 모델링하며, 양극과 음극 사이에 분리 막은 저항으로 모델링한다. 이때 양극, 음극을 모델링한 회로에서의 저항을 전하 전달 저항(charge transfer resistance)라 부르고, 커패시터를 이중층 커패시터(Double layer capacitance)라고 부르며, 분리 막을 모델링한 저항은 용해 저항(Solution resistance)라 한다. 마지막으로 음극/양극과 분리 막 사이에 표면 막(Surface films)이 생기는데 전하가 충/방전을 하는 과정에서 생기게 된다. 이를 역시 저항과 커패시터의 병렬연결로 표현하며 이를 표면 막 저항(Surface Film resistance)과 표면 막 커패시턴스(Surface Film capacitance)라 부른다. <그림 1>과 같이 배터리 내에서 이온화 되는 물질들은 서로 반응을 하며 전자를 제공해서 일정한 전류



<그림 1> 배터리 등가회로 모델링

를 만들어 준다. 이런 배터리를 모델링하기 위해 먼저 외부 단자에 아무런 부하가 없는 개회로에서의 전압 강하를 살펴보아야 한다. 이를 확인할 때에는 DOD에 관한 함수로써 그래프를 살펴보며, Lithium Ion polymer Battery를 이용하여 측정 하였다.[2] 본 연구에 사용된 배터리의 사양은 <표 1>에 자세히 나와 있다.

<표 1> 배터리 사양

Item	Rating	Note
Nominal Capacity	4000mAh	Discharge : 0.2C
Cut off Voltage	2.75V	
Nominal Voltage	3.7V	
Charge Current	Standard	0.2CmA
	Rapid	0.5CmA
Charge Voltage	4.2V	Cut off current: 0.05CmA
Maximum Charge Voltage	4.25V	

2.2 개회로 전압(Open Circuit Voltage) 모델링

기존의 배터리 모델링은 단순한 전압원과 저항의 직렬연결로 표현된다. 이는 충/방전 순환을 반영하지 못하므로 SOC를 기반으로 한 비선형적인 항이 추가적으로 필요하다. 개회로전압(OCV : Open Circuit Voltage)은 다음과 같이 정의 할 수 있다.[3]

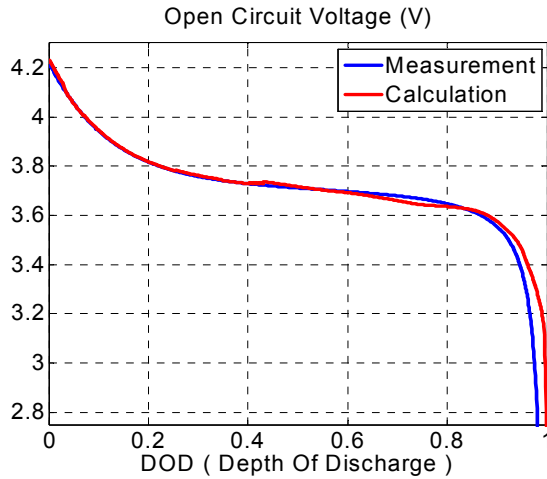
$$E = E_0 - k \frac{Q}{Q - \int_0^t i(\tau) d\tau} + Ae^{B \int_0^t i(\tau) d\tau}$$

$$DOD(t) = \frac{\int_0^t i(\tau) d\tau}{Q}$$

$E_0$  : Battery constant voltage (V)       $Q$  : Battery capacity (Ah)  
 $k$  : Polarization voltage                       $A$  : exponential zone amplitude (V)  
 $B$  : exponential zone time constant inverse (Ah)<sup>-1</sup>

이 방정식은 비선형 항인  $k \frac{Q}{Q - \int_0^t i(\tau) d\tau}$  항이 전류 크기에 따른 비선

형적 전압강하와 실제 배터리의 전하량(잔량)을 반영한다. 실험에서는 Lithium Ion Polymer Battery를 Impedance Analyzer를 이용해서 측정 하였다. 측정 결과와 개회로 전압에 대한 수식을 MATLAB으로 계산한 결과는 <그림 2>와 같다.



〈그림 2〉 Open Circuit Voltage의 측정 및 계산 결과

### 2.3 교류 임피던스(AC Impedance) 모델링

배터리는 전하를 저장하고 있다가 외부에 부하가 걸릴 때 그 부하에 전하를 일정하게 공급하는 역할을 한다. 따라서 커패시턴스 적인 역할이 필요하며, 그 사이는 이온화 물질로 채워져 있기 때문에 저항적 역할도 역시 필요하다. 배터리내부의 이온화손실 저항 등을 고려한 모델링이 <그림 1>의 회로와 같다.[4] 이때의 전하 전달 저항, 이중층 커패시터, 표면 막 저항, 표면 막 커패시터, 용해 저항( $R_{el}$ ,  $C_{dl}$ ,  $R_m$ ,  $C_m$ ,  $R_s$ )값들은 AC 임피던스 분석법(AC Impedance Spectrum)에 의해 추출할 수 있다. 2.2절에서 제시한 수식으로 인해 개회로에서의 DOD에 따른 전압 변화를 알 수 있었다. 그 결과 배터리 내부의 물질에 따라 저항과 커패시터로 병렬 연결시킨 등가회로 모델을 이용해서 전기화학(Electrochemical)적 특성을 반영한 고주파 상태에서의 해석을 가능하게 한다.

임피던스 측정은 SOC가 0%일 때 즉 차단 전압(Cutoff Voltage : 2.75V)와 SOC 25%, SOC 50%, 그리고 SOC 75%에서 4회 측정된 결과를 이용했고 이 네가지 결과를 이용하여 곡선 적합 결과를 유도할 수 있다. 이 데이터는 정확한 결과 이므로 최소제곱회귀분석을 이용하기보다는 보간법을 사용하여 적합하도록 한다. 6가지 측정 결과를 통해 곡선 적합을 하는 과정에서 눈에 띄는 변화를 보이는 표면 막 커패시턴스2의 경우를 제외하고는 모두 지수함수 근사와 간단한 Newton 보간법을 사용했다.[5] 표면 막 커패시턴스2의 값을 단순히 지수 함수적 근사를 시키면 매우 상이한 결과가 나오게 된다. 따라서 Lagrange 보간법을 사용해 4차함수로 근사 시켰다. 이를 위해서 5개의 임피던스 측정 데이터가 필요한데 이를 위해 SOC 100%의 값을 곡선의 경향성에 따라 추가로 값을 대입하여 적합 시켰다. 곡선 적합의 결과가 <그림 3>에 있다.

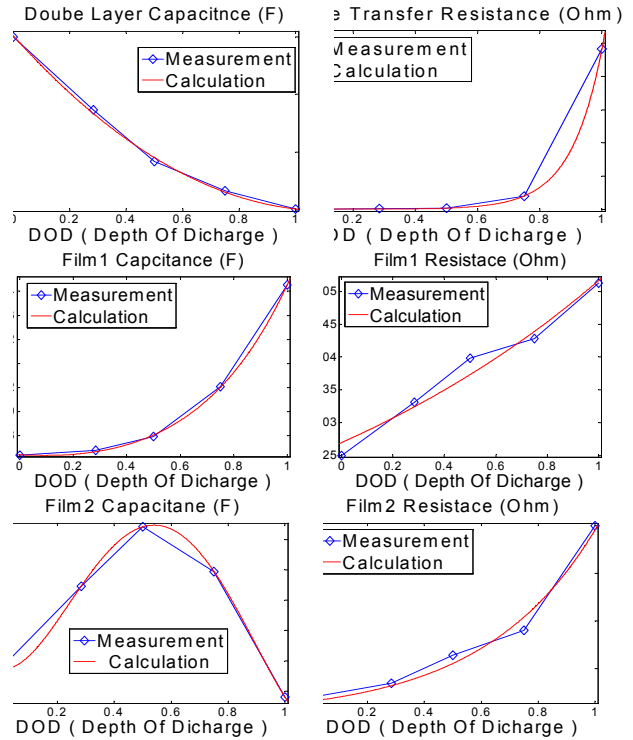
이중층 커패시턴스의 경우는 지수 함수로 근사시켜도 무관하나 Newton 보간법을 사용해 양끝과 가운데를 참조한 2차함수로 근사시켰다. 표면 막 커패시턴스2의 값은 가장 변화가 큰 모습을 보였으며 이에 따라 지수 함수적 근사를 시키면 SOC = 100%에서 예상치 못한 결과가 나온다. 따라서 Lagrange 보간법의 개념을 이용한다. 초기 값에 경향성을 통해 예측한 값을 대입하여 5개의 데이터에 대해 4차함수로 적합하였다. 표면 막 커패시턴스1의 경우 단순한 지수 함수적 근사도 가능하지만 조금 더 정확한 결과를 반영하기 위해 두 개의 지수 항으로 적합 시켰다. 그 결과는 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 C_{dl}(DoD) &= 1220DoD^2 - 2721DoD + 1508 \\
 C_{f2}(DoD) &= 11.15DoD^4 - 25.32DoD^3 + 14.35DoD^2 - 0.3706DoD + 3.75 \\
 C_{f1}(DoD) &= 0.1636e^{-0.1666DoD} + 0.008504e^{2.506DoD}
 \end{aligned}
 \quad (1)$$

전하 전달 저항, 표면 막 저항1/2는 경향성 자체가 지수 함수이기 때문에 간단하게 지수 함수 적합을 통해 구하였다. 이 경우 2차함수로 근사 시켜도 무관하며 둘 사이의 오차는 5%내외로 매우 작고, 그 결과는 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned}
 R_{el}(DoD) &= 0.0004572e^{9.957DoD} \\
 R_{f1}(DoD) &= 0.02694e^{0.6509DoD} \\
 R_{f2}(DoD) &= 0.01572e^{2.523DoD}
 \end{aligned}
 \quad (2)$$

초기 값(SOC=100% (= DoD=0))을 반영한 결과 곡선 적합이 정확하게 적합 됨을 알 수 있으며 보간법을 이용한 초기값 및 최종값을 반영한 곡선 적합이 완성되었음을 확인 할 수 있다.



〈그림 3〉 배터리 RC 파라미터 측정 및 계산 결과

### 3. 결 론

전기 자동차에서 고전압, 고주파 전장품들의 비중이 커지면서 그에 따른 EMI/EMC문제 역시 대두되고 있다. 이를 위해 최적화된 배터리 모델링을 통해 설계 단계에서부터 전자기 해석을 할 수 있게 된다면, EMI 문제를 기초 단계에서부터 해결 할 수 있으며 개선을 통해 다른 전장품과의 문제 역시 해결 할 수 있게 된다. 현재 전기자동차/하이브리드 자동차의 RE/CE(Radiated Emission/Conducted Emission)에 대한 가이드라인이 국내/국외에 명확히 제시되어 있지 않다. 전장품들의 정확한 분석이 있어야 그에 따른 기준을 잡을 것이다. 본 논문에서 SOC상태에 따른 경계 조건을 반영한 수식을 통해 나온 결과는 기존의 결과보다 배터리의 정확한 예측을 가능하게 했고 이로 인해 보다 정확한 배터리 모델링을 할 수 있게 되었다. 이를 통해 전기/하이브리드 자동차의 주요 전장품 중의 하나인 배터리에 대한 기준을 제시 하는데 본 논문이 도움이 될 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.  
(No. 20104010100630-11-1-000)

### [참 고 문 헌]

- [1] 이준상, 김종민, 남기훈, 배현주, 성진태, 나완수 “하이브리드/전기 자동차용 고전압 커패시터의 전자기 해석”, 전기학회논문지, 60, 131-137, 2011
- [2] Marc Doyle, “Modeling of Galvanostatic Charge and Discharge of the Lithium/Polymer/Insertion Cell”, Electrochem. Soc., Vol. 140, 1526-1533, 1993
- [3] Olivier Tremblay, “A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles”, Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. VPPC. 2007. IEEE, Vol.9-12, 284-289, Sept. 2007
- [4] Ravishankar Rao, Daler N. Rakhmatov “Battery Modeling for Energy - Aware System Design”, IEEE Computer Society, Vol. 36, 77-87, 2003
- [5] Steven C. Chapra, Raymond P. Canale, “Numerical Methods for Engineers”, Mc Graw Hill, 5<sup>th</sup> Edition, 338-424, 2007