

AC 임피던스를 이용한 리튬 전지의 충전상태 추정에 관한 연구

李鐘鶴*, 金尙鉉*, 金旭*, 崔宇鎭†

A Research on the Estimation Method for the SOC of the Lithium Batteries Using AC Impedance

Jong-Hak Lee, Sang-Hyun Kim, Wook Kim, and Woojin Choi

요 약

리튬계열 전지는 다른 이차전지에 비해 평균전압 및 에너지 밀도가 높으며 가볍고 수명이 긴 장점으로 인해 휴대용 전자기기에 폭넓게 사용되고 있으며, 특히 전기 자동차용으로 높은 수요가 예측되고 있다. 전기 자동차용 리튬 전지의 경우 운행 가능 거리의 정확한 계산이 요구되며, 또한 크랭킹이 불가능한 상태로 방전이 되지 않아야 하므로 충전상태에 대한 정확한 정보는 신뢰성 있는 운전을 위한 필수적인 요소가 된다. 본 논문에서는 AC 임피던스를 이용하여 리튬 폴리머 전지의 충전상태(SOC: State of Charge)를 추정하는 새로운 방법에 대해 제안한다. 제안된 방법에서는 주파수 별로 측정된 임피던스를 등가 임피던스 모델에 커브 피팅하여 파라미터를 추출하고, 추출된 파라미터를 이용하여 충전상태를 추정하였다. 제안된 방법에 의해 추출된 파라미터를 통해 리튬전지의 SOC 추정이 가능함을 증명하였고, 다수의 제조사에서 제작된 비슷한 용량의 리튬 폴리머 전지를 대상으로 한 실험을 통해 제안된 방법의 유용함을 검증하였다.

ABSTRACT

Lithium batteries are widely used in mobile electronic devices due to their higher voltage and energy density, lighter weight and longer life cycle compared to other secondary batteries. In particular, high demand for lithium batteries is expected for electric cars. In case of lithium batteries used in electric cars, driving distance must be calculated accurately and discharging should not be done below the level of making it impossible to crank. Therefore, accurate information about state of charge (SOC) becomes an essential element for reliable driving. In this paper, a new method of estimating the SOC of lithium polymer batteries by using AC impedance is proposed. In the proposed method, parameters are extracted by fitting a curve of impedance measured at each frequency on the equivalent impedance model and extracted parameters are used to estimate SOC. Experiments were conducted on lithium polymer batteries with similar capacities made by different manufacturers to prove the validity of the proposed method.

Key Words : Lithium Polymer Battery, State-of-Charge, AC Impedance, Electrochemical Impedance Spectroscopy, Time Constant

†교신저자 : 정희원, 숭실대 전기공학부 조교수
E-mail : cwj777@ssu.ac.kr

*학생회원, 숭실대 전기공학부 석사과정

접수일자 : 2009. 8. 18 1차 심사 : 2009. 9. 15

심사완료 : 2009. 10. 1

1. 서 론

휴대용 전자 기기의 복합화가 진행됨에 따라 고 성능, 고 안전성, 친환경, 초경량 에너지 저장장치의 필

요성이 증대되고 있으며, 이와 같은 조건을 만족시킬 수 있는 이차전지로서 리튬 이온 전지(Lithium-ion Battery)가 각광 받고 있다. 리튬 이온 전지는 니켈 수소(Ni-MH) 전지나 니켈-카드뮴(Ni-Cd) 전지보다 평균 전압과 에너지 밀도가 높고 자기 방전율이 낮으며 수명이 길고 메모리 효과가 없어서 사용이 편리하다.^[1-4] 그러나 알려진 바와 같이 리튬 이온 전지는 폭발의 위험성이 상존하며, 제조비용이 높고 대형화에도 어려움이 있어, 이러한 문제의 해결방안으로 리튬 폴리머 전지(Lithium Polymer Battery)가 대두되고 있다. 리튬 폴리머 전지는 산화 및 환원 반응이 일어나는 음극과 양극, 두 전극의 물리적 접촉을 방지하기 위한 분리막, 그리고 이온의 이동이 일어나는 매체로서 역할을 하는 고체 또는 겔 형태의 전해질로 구성되어 있다.

이러한 리튬 폴리머 전지가 휴대용으로 사용되는 경우 전자기기의 사용 가능시간을 계산할 수 있어야 하며, 중요 시설이나 전산망에 전력을 공급하는 경우 방전에 의한 갑작스런 셧다운을 피해야 한다. 또한, 전기 자동차에 사용되는 고용량의 리튬 폴리머 전지의 경우 운행 가능 거리의 정확한 계산이 요구됨과 동시에 크랭킹이 불가능 할 정도로 방전되지 않도록 하여야 한다.

배터리의 충전상태는 직접 측정이 불가능 하므로 주로 단자전압이나 전류를 이용한 간접적인 방법에 의해 측정되는데 배터리의 비선형성으로 인해 단자전압만으로 그 잔존 용량을 정확히 알 수 있는 방법은 드물며, 특히 리튬 폴리머 전지의 충전상태 추정에 관해 정립된 방법은 많지 않다. 이차전지 충전상태의 추정을 위해 많이 사용되는 방법은 전류 적산 (Coulomb Counting)법이며 배터리의 충/방전 전류를 적산하여 충전량을 계산하는 방법이다. 정확한 전류센서가 사용되면 매우 정확하고 신뢰성 있는 정보를 얻을 수 있으나 이 방법은 큰 값의 충/방전 전류가 매우 짧은 시간 동안 교차하는 동적 시스템에서는 오차가 누적 되어 적용이 어렵게 되는 단점이 있다.^[5]

배터리의 SOC 추정에 칼만 필터(Kalman Filter)를 이용하는 방법이 있으나 알고리즘 자체가 복잡하고, 정확한 시스템 모델링이 수반되어야 하며, 정확한 추정을 위해서는 상태변수를 많이 잡아야 하는 문제가 있다. 또한, 이득 설정이 복잡하여 노이즈나 외란이 존재할 경우 시스템의 이득이 발산할 수 있으며, 칼만 필터의 기본 전제 중 하나는 외란이나 시스템 노이즈(Process Noise)가 랜덤 가우시안 분포(Random

Gaussian Distribution)를 가져야만 한다는 것인데, 이와 같은 전제는 실제동작 상태에서는 잘 일치하지 않기 때문에 칼만 필터가 항상 최적의 상태로 동작하지 않는 문제도 있다.^[6-8]

또 다른 방법으로 등가 임피던스 모델의 파라미터를 통해 SOC를 추정하는 방법으로 전기화학적 임피던스 분광법 (Electrochemical Impedance Spectroscopy)에 의한 AC 임피던스를 이용하는 방법이 있다. 이 방법은 전기화학적 임피던스 분광법을 통해 전지의 SOC별 AC 임피던스를 측정하고 등가 임피던스 모델을 이용하여 커브피팅 한 후 등가 임피던스 모델의 파라미터를 추출하고, 그 파라미터와 SOC와의 상관관계를 분석하여 배터리의 SOC를 추정하는 방법이다.^[9-13]

그 외 신경망^[14-15] 이나 퍼지 로직^[16-17]을 사용하는 방법이 있는데, 전자의 경우 신경망 설계 시 경험적인 요소가 많고 추정치의 오차가 Global Minimum으로 수렴하지 않을 수 있기 때문에 초기 값을 다르게 하여 여러 번 실행해야 하는 단점이 있으며, 후자의 경우는 지식과 경험으로부터 추상화된 모델로 복잡한 시스템이 요구되게 된다. 따라서, 이 두 가지 방법은 모두 많은 계산량과 제한적인 신뢰성 때문에 실제 시스템에서는 거의 사용되지 않고 있다. 본 논문에서는 전기화학적 임피던스 분광법을 이용하여 리튬 폴리머 전지의 충전상태를 추정하는 새로운 방법을 제안하였고 다수의 제조사에서 제작된 비슷한 용량의 리튬 폴리머 전지를 대상으로 한 실험을 통해 제안된 방법의 유용함을 검증하였다.

2. 실 험

2.1 충/방전을 통한 배터리 정격 용량의 결정

전지의 SOC는 특정 시점에서 전지가 방출할 수 있는 방전 전하량을 정격 전하량에 대해 표현한 값으로 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$SOC = \frac{Q_{releasable}}{Q_{rated}} \times 100\% \quad (1)$$

먼저 전지의 정격용량을 확인하기 위한 충 방전 실험을 진행하였다. 충전 최대 전압 4.2V까지 1C의 정전류 모드로 충전을 하고 이 후 4.2V의 정전압 모드로 변경하여 전류가 0A에 도달할 때까지 충전하는 CC-CV 충전법을 통해 배터리를 충전하였다. 이후 IEC 62133규정에 의거하여 리튬 폴리머 배터리를 0.2C

의 정전류로 최대전압 4.2V에서 방전종지전압 3.0V까지 방전하면서 전하량을 측정하였다. 충전과 방전사이의 방치기간은 2시간으로 정하여 실험을 진행하였고, 정격용량에 이르지 못할 경우 5차례까지 충 방전을 실시하여 측정된 값 중 최대값을 정격용량으로 산정하였다.^[18] 실험에 사용된 전지는 BNK에서 제작된 상용 리튬 폴리머 전지로 공칭 전압, 최대전압, 방전종지전압 및 공칭용량은 각각 3.7V, 4.2V, 3V 및 1600mAh이다.

그림 1에는 BNK사 리튬 폴리머 배터리의 충전 실험에서 얻은 충전 전류와 배터리 전압과의 관계를 나타낸 곡선이며, 그림 2는 0.2C의 정전류 방전 실험을 통해 얻은 전압곡선을 나타낸 것이다. 충/방전 실험을 통해 구한 정격용량(1568mAh)을 기준으로 방전시간에 따라 리튬 폴리머 전지의 충전 상태를 계산할 수 있다.

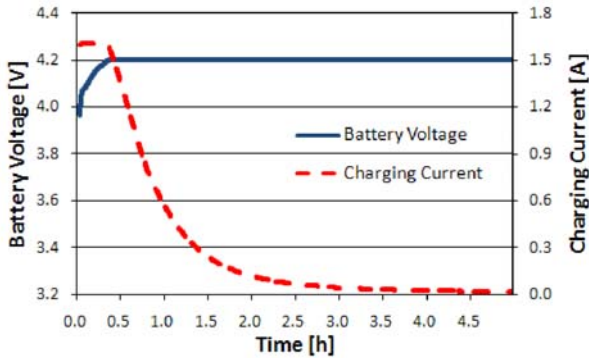


그림 1 BNK 리튬 폴리머 배터리의 충전 곡선
Fig. 1 The charging curve of the BNK Lithium Polymer Battery

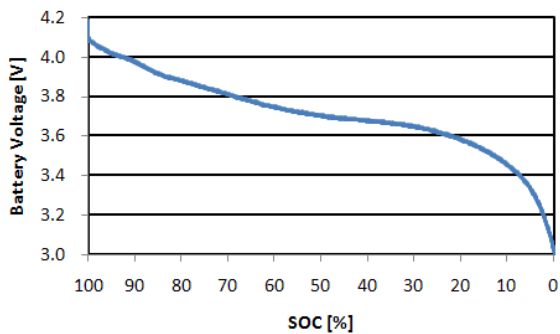


그림 2 BNK 리튬 폴리머 배터리의 방전 곡선
Fig. 2 The discharging curve of the BNK Lithium Polymer Battery

2.2 전기화학적 임피던스 분광법

EIS는 측정대상에 대한 작은 섭동을 유도하고 유도된 섭동에 대한 응답으로부터 AC임피던스를 측정하고

측정된 AC 임피던스를 물리적인 설명이 가능한 등가 임피던스 모델을 이용하여 커브피팅 함으로써 측정대상을 모델링하는 방법이다.^[7] 전지의 임피던스는 내부 상태를 그대로 반영하므로 EIS방법을 이용하여 임피던스를 측정하고 등가회로의 파라미터를 구하면 충전 상태에 관한 정확한 정보를 얻을 수 있다.

배터리의 AC 임피던스 스펙트럼을 얻기 위한 실험 장비로 BPS 1000FL 을 사용하였으며, 임피던스의 측정은 10mHz~1kHz 사이의 주파수에서 진행되었다. 인가된 섭동 전류는 실험의 선형성을 보장하기 위해 충전 전하량의 5%를 넘지 않는 크기로 정하였고 이때 섭동에 의한 응답 전압은 50mV이내였다. 임피던스 측정 실험은 상온(25°C)에서 진행하였고 매 20%의 충전 단계 별로 20%~100%의 범위에서 실험을 진행하였다. 매 충전단계 마다 2시간의 방치 기간을 갖고 EIS실험을 통해 AC 임피던스를 측정하였다.

3. 결과 및 해석

3.1 리튬 폴리머 전지의 임피던스 스펙트럼

그림 3에는 EIS실험을 통해 측정된 BNK사 배터리의 SOC에 따른 임피던스 스펙트럼을 나이퀴스트 선도에 나타내었다. $Re(Z) \approx 0.75\Omega$ 정도에서 임피던스 스펙트럼이 실수축과 교차하는 것을 확인할 수 있으며, 1kHz~20Hz의 주파수 범위에서 작은 반원이 하나 존재하고, 20Hz~0.1Hz의 주파수 범위에서 또 하나의 큰 반원이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 또한 0.1Hz보다 낮은 저주파 영역에서는 실수 축과 45°의 각도로 뻗어나가는 와버그 임피던스(Warburg Impedance)를 확인할 수 있다.

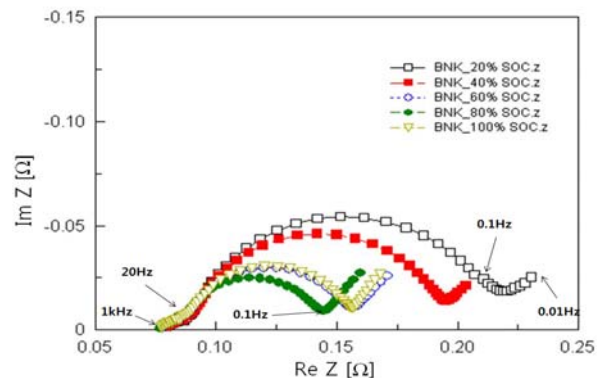


그림 3 각 SOC별 BNK 리튬 폴리머 전지의 임피던스 스펙트럼
Fig. 3 Impedance spectra of the BNK Lithium Polymer Battery at each SOC

충전 상태별 임피던스를 관찰해보면, 리튬전지의 SOC가 줄어드는 경우 작은 반원은 그 크기가 거의 변하지 않고 일정한 반면, 큰 반원은 그 반경이 점점 커지는 것을 확인할 수 있다. 이것은 전지의 방전이 진행됨에 따라 내부 임피던스가 커짐에 따라 나타나는 현상이며, 따라서 등가 임피던스 모델에서 저주파 영역의 반원을 나타내는 등가 임피던스 회로의 파라미터를 추출하여 분석하면 충전 상태를 추정할 수 있음을 알 수 있다.

3.2 리튬 폴리머 전지의 내부 반응과 임피던스 등가회로

리튬 폴리머 전지의 대표적 내부 반응인 Passivation, Charge Transfer, Diffusion 반응은 서로 다른 시정수를 가지며, 따라서 나이퀴스트 임피던스 평면상 서로 다른 주파수 영역에서 관찰된다. 그림 4는 40%의 SOC에서 측정한 BNK사 리튬 폴리머 배터리의 임피던스 플롯을 나타낸 것이다. 리튬 폴리머 배

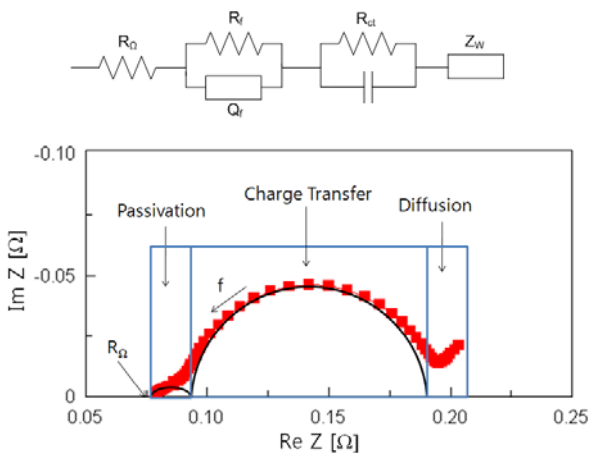


그림 4 리튬 전지의 임피던스 스펙트럼 및 등가회로
Fig. 4 Impedance spectrum and equivalent circuit of the Lithium Battery

표 1 각 SOC별 BNK 리튬 폴리머 전지의 파라미터
Table 1 Parameters of the BNK Lithium Polymer Battery at the SOC

SOC [%]	20	40	60	80	100
R_{ct} [mΩ]	93.5	80.0	50.0	40.7	52.6
C_{dl} [F]	2.74	2.69	2.65	2.67	2.48
$\tau = R_{ct} \times C_{dl}$ [Time Constant]	0.27	0.22	0.13	0.11	0.13

터리의 등가회로는 여러 종류가 있지만 본 논문에서는 앞서 설명한 부동화(Passivation) 현상, 전하전송 (Charge Transfer) 현상, 확산(Diffusion) 현상을 각각 나타내는 ZARC(R_f/Q_f), R_{ct}/C_{dl} 병렬회로 그리고 Z_w 와 내부저항 R_0 를 포함하는 등가회로를 이용하여 리튬 폴리머 배터리의 임피던스 스펙트럼을 분석하였다(그림 4).

등가회로에서 내부저항 R_0 은 전해질, 전극, 단자대의 저항성분 등 배터리의 전극과 내부를 연결하는 전체 저항을 의미하며, 나이퀴스트 선도에서 실수축과 교차하는 지점에서의 값이 된다. 부동화 현상이 있는 리튬 전지에서는 임피던스 스펙트럼에서 작은 반원이 고주파 영역에 나타나며 저항과 커패시터의 병렬구조로 모델링할 수 있다. 그러나 그림 4에서 보듯이 고주파 영역의 작은 반원은 약간 내려앉은(Depressed) 형태의 반원으로 Resistance(R_f)과 CPE(Constant Phase Element(Q_f))의 병렬로 표현하는 것이 정확하다.^[19-20]

결국 이 작은 반원이 전지 사용 시 음극표면에 생성되는 부동화막(Passivation Film)의 성분을 나타내며, 막의 두께가 일정하지 않고 불규칙적이므로 CPE(Q_f)를 사용하여야만 적절히 표현될 수 있으며, 식(2)와 같이 나타낸다.^[20-22]

$$Z_{CPE} = Q^{-1}(j\omega)^{-n} \tag{2}$$

전하전송 현상을 나타내는 큰 반원은 전하전송저항 (Charge Transfer Resistance(R_{ct}))와 전기이중층 커패시턴스(Double Layer Capacitance(C_{dl}))의 병렬연결로 표현되는데, 두 전극(양극과 음극)과 전해질 사이의 계면을 통과하는 전자 이동 반응을 나타낸다.^[20,23]

그림 4의 등가회로를 이용한 커브 피팅은 Zview를 이용하여 실행되었다. 앞서 설명한대로 충전상태별 임피던스 플롯의 차이가 뚜렷한 큰 반원에 관련된 파라미터를 표 1에 나타내었고, 이들 파라미터의 충전상태별 추세를 그림 5에 나타내었다. 저주파 영역의 큰 반원과 관련된 RC 회로의 파라미터인 전하전송저항과 전기이중층 커패시턴스를 확인해 보면 큰 반원의 반지름 값으로 나타나는 R_{ct} 는 20%~80% 사이의 SOC 영역에서는 감소하다가 80%~100% 사이의 SOC영역에서 증가하는 추세이며, 이는 나이퀴스트 임피던스 플롯(Nyquist Impedance Plot)에서 나타나는 반원의 크기의 변화 추세와도 일치한다. 반면, C_{dl} 은 SOC의 변화에 따른 파라미터 값의 변화가 있지만, 대략 10% 이내로 그 변화의 폭이 크지 않음을 알 수 있다.

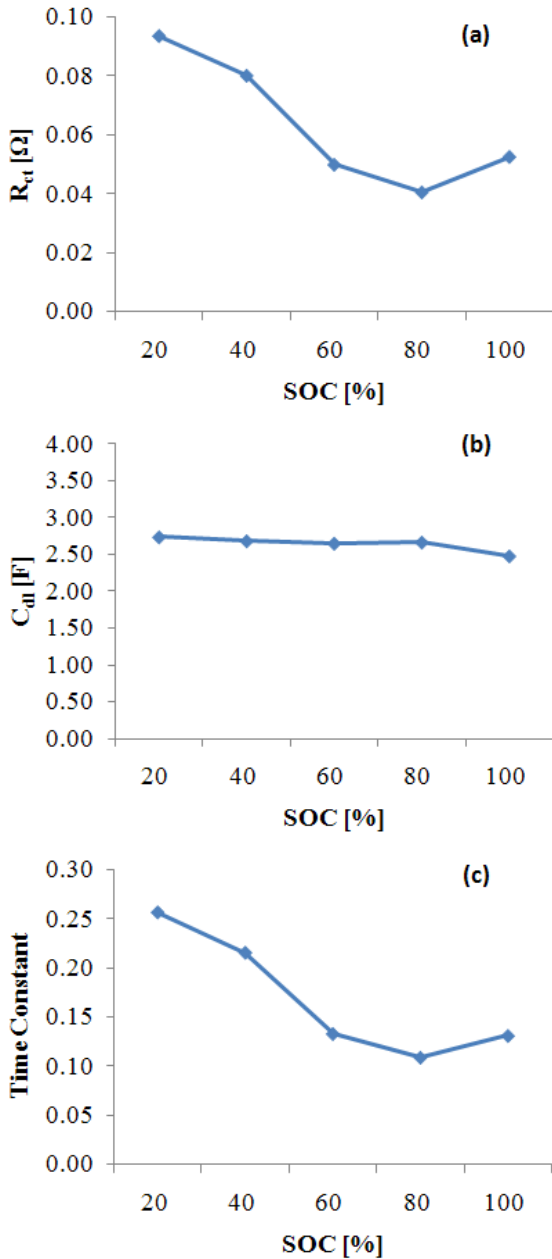


그림 5 BNK 리튬 폴리머 전지의 각 SOC별 파라미터 (a) R_{ct} , (b) C_{dl} , (c)Time constant
 Fig. 5 Parameters of the Lithium Polymer Battery at each SOC (a) R_{ct} , (b) C_{dl} , (c)Time constant

또한, 파라미터의 SOC별 추세를 수치 해석적으로 도출하였는데 각 파라미터와 SOC와의 관계를 비교해 본 결과, 그림에 표시된 바와 같이 전하전송저항(R_{ct}) 단독으로 SOC의 추정이 가능하며, 전하전송저항과 전기이중층 커패시턴스의 곱인 시정수를 이용하여서도 정확한 SOC의 추정이 가능함을 알 수 있다.

4. 다수의 제조사별 배터리를 이용한 실험

BNK사 배터리의 경우 SOC의 변화에 따른 R_{ct} 파라미터나 시정수의 변화 추세를 이용하여 SOC를 추정할

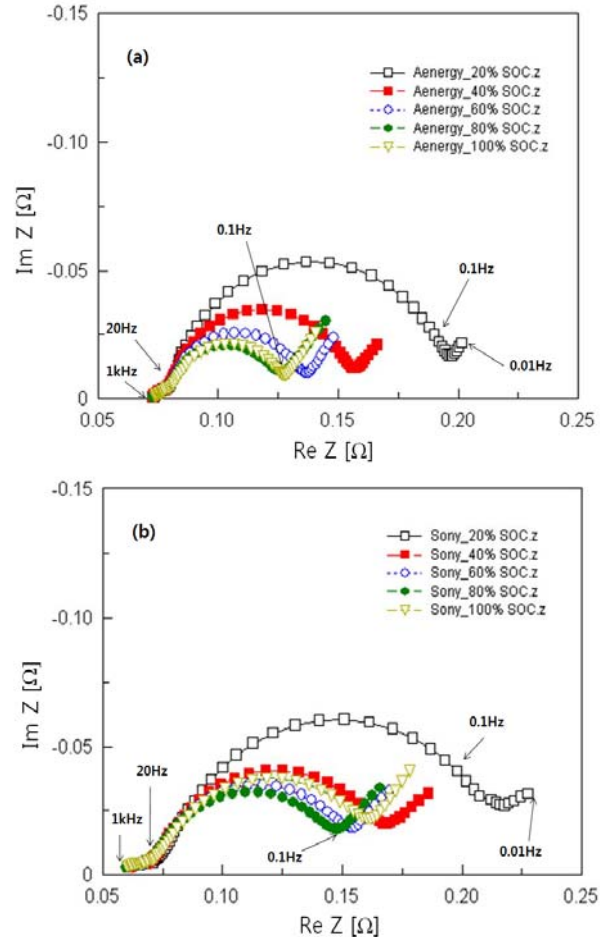


그림 6 배터리의 각 SOC별 임피던스 스펙트럼 (a)Aenergy, (b)SONY
 Fig. 6 Impedance spectra of the Batteries at each SOC (a)Aenergy, (b)SONY

표 2 각 SOC별 Aenergy 리튬 폴리머 전지의 파라미터
 Table 2 Parameters of the Aenergy Lithium Polymer Battery at the SOC

SOC [%]	20	40	60	80	100
R_{ct} [mΩ]	96.4	63.4	46.7	36.4	37.5
C_{dl} [F]	3.27	3.26	3.23	3.42	3.41
$\tau = R_{ct} \times C_{dl}$ [Time Constant]	0.31	0.21	0.15	0.12	0.13

표 3 각 SOC별 SONY 리튬 폴리머 전지의 파라미터
Table 3 Parameters of the SONY Lithium Polymer Battery at the SOC

SOC [%]	20	40	60	80	100
R_{ct} [mΩ]	105	63.1	55.7	51.3	58.1
C_{dl} [F]	4.40	4.47	4.19	4.20	4.57
$\tau = R_{ct} \times C_{dl}$ [Time Constant]	0.46	0.28	0.23	0.22	0.27

수 있음을 확인하였다.

여기서는 다수의 제조사에서 만들어진 리튬 폴리머 배터리를 이용한 실험을 통해 전하전송저항(R_{ct})이나 시정수를 이용하여 SOC의 추정이 가능함을 검증하여 동일한 방법을 제조사에 관계없이 적용할 수 있음을 확인하기 위한 실험을 실시하였다.

실험 대상 배터리로는 Aenergy 및 Sony사 배터리 중 BNK사 배터리와 비슷한 용량의 상용 리튬 폴리머 배터리를 선정하였으며, 공칭 전압, 최대전압 및 방전 종지전압은 3.7V, 4.2V 및 3V로 BNK사 배터리와 동일하고, 공칭용량은 각각 1800mAh 및 1350mAh이다. 두 제조사 배터리의 정격용량을 알기 위해 앞 절에서 서술한 방법으로 충/방전 실험을 실시하여 정격용량을 확인하였고, 이를 기준으로 방전시간에 따라 리튬 폴리머 배터리의 충전상태를 계산하였다. EIS를 이용하여 측정된 임피던스 스펙트럼은 그림 4의 등가회로를 이용해 커브피팅 하여 등가회로의 파라미터를 추출하였다. Aenergy 및 Sony사 배터리의 임피던스 스펙트럼을 그림 6에 각각 나타내었으며 피팅을 통해 추출된 모델의 파라미터는 표 2와 표 3에 각각 나타내었다.

그림 6의 Aenergy 및 Sony사 배터리의 임피던스 스펙트럼을 살펴보면 BNK사와 거의 동일한 모양으로 나이퀴스트 임피던스 선도에서 1kHz~20Hz의 주파수 범위에 작은 반원, 20Hz~0.1Hz의 주파수 범위에 큰 반원이 나타나는 형태이다. 두 배터리도 방전이 진행됨에 따라 임피던스 플롯의 작은 반원은 그 크기에 큰 변화가 없었고 큰 반원의 반경이 커지는 것을 확인할 수 있으며, 0.1Hz보다 작은 주파수에서는 와버그 임피던스가 나타나 BNK사 배터리의 임피던스와 형태가 매우 유사함을 알 수 있다.

Zview를 이용한 커브피팅을 통해 등가 임피던스 모델로부터 추출된 Aenergy, Sony 및 BNK사 배터리의 R_{ct} 파라미터 및 시정수와 SOC와의 관계를 그림 7과 같이 그래프로 나타내보았다. 분석 결과 3개 제조사

표 4 추세선 수식의 계수와 피팅 정확도
Table 4 Coefficient and Fitting Accuracy of Trend Line Equation

		a(10 ⁻⁷)	b(10 ⁻⁴)	c(10 ⁻²)	d	R ²
BNK	R_{ct}	3.927	-0.579	0.157	0.083	0.9902
	Time Constant	9.135	-1.315	2.884	0.245	0.9888
Aenergy	R_{ct}	-0.496	0.222	-0.279	0.144	0.9988
	Time Constant	-2.385	0.881	-0.995	0.480	0.9998
Sony	R_{ct}	-2.431	0.617	-0.498	0.181	0.9889
	Time Constant	-6.656	2.073	-1.921	0.764	0.9930

모두 R_{ct} 의 파라미터와 SOC와의 관계가 비슷한 추세를 보임을 알 수 있으며, R_{ct} 와 C_{dl} 의 곱인 시정수를 이용하여서도 SOC를 추정할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 그림에서 보듯이 R_{ct} 만을 이용하는 것 보다 시정수를 이용할 경우 SOC별 파라미터 값의 변화가 더 뚜렷하여 추정의 정확도를 더욱 높일 수 있음을 알 수 있다.

등가회로의 파라미터 값을 이용하여 배터리의 SOC를 추정하기 위해 SOC에 따른 R_{ct} 와 시정수의 변화를 3차식으로 근사화하였다. 각 제조사별 리튬 전지의 SOC에 따른 R_{ct} 와 시정수의 변화에 대한 추세선의 정확도는 최소 자승법을 통해 계산한 결과 98%이상의 정확도를 보임을 확인하였다. 따라서, 이 추세선의 수식을 이용하면 리튬 폴리머 배터리의 SOC를 정확히 추정할 수 있음을 알 수 있다. R_{ct} 와 시정수 변화에 대한 추세선의 수식은 식(3)과 같이 SOC에 관한 3차방정식으로 나타낼 수 있으며, 수식의 계수 값들과 피팅의 정확도(R^2)는 표 4에 나타냈다.

$$\tau = a(SOC)^3 + b(SOC)^2 + c(SOC) + d \quad (3)$$

$$SOC_1 = \frac{A}{3\sqrt[3]{2}a} - \frac{\sqrt[3]{2}(3ac - b^2)}{3aA} - \frac{b}{3a} \quad (4)$$

$$SOC_2 = \frac{B(3ac - b^2)}{3\sqrt[3]{4}A} + \frac{AB}{6\sqrt[3]{2}a} - \frac{b}{3a}$$

$$SOC_3 = \frac{-B(3ac - b^2)}{3\sqrt[3]{4}A} - \frac{AB}{6\sqrt[3]{2}a} - \frac{b}{3a}$$

(단, $A = \sqrt[3]{C + \sqrt{4(3ac - b^2)^3 + C}}$, $B = 1 + \sqrt[3]{3i}$, $C = 9abc - 2b^3 - 27a^2d$ 이다.)

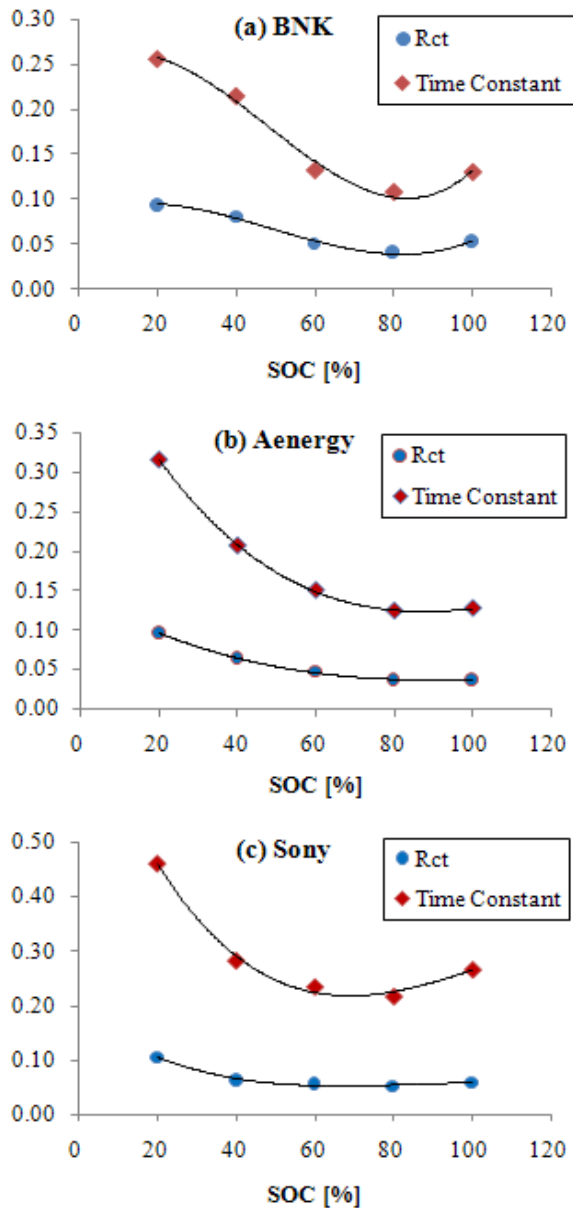


그림 7 각 SOC별 리튬 폴리머 전지의 파라미터 (a)BNK, (b)Aenergy, (c)SONY

Fig. 7 Parameters of the Lithium Polymer Battery at each SOC (a)BNK, (b)Aenergy, (c)SONY

따라서, 특정 리튬 폴리머 전지에 대해 EIS 실험을 실시하고 이로부터 얻어진 시정수(τ)의 값을 식(3)의 좌변에 대입하고 3차 방정식의 일반해에 관한 식(4)를 이용하여 SOC를 추정해 낼 수 있다.

그런데, 식(4)에서 보듯이 시정수를 식(3)에 대입하여 수식을 풀면 3개의 해(SOC₁, SOC₂, SOC₃)가 얻어진다. 보통의 경우 하나의 유용해와 두 개의 무용해가

구해지는데, 그림 7을 자세히 살펴보면, 유용해가 두 개 구해질 수 있는 구간이 있음을 알 수 있다. 예를 들어 BNK사의제품의 경우 그림 7의 (a)에서 보듯이 SOC 80%를 중심으로 60%에서 80%의 파라미터와 80%에서 100%사이의 파라미터가 대칭적인 값을 가져 이 구간에서 측정된 시정수와 식(3), (4)를 이용하여 해를 구할 경우 두 개의 SOC값이 구해지는 문제가 발생한다. 이러한 문제는 연속적으로 추정된 SOC 값을 이용하여 계산된 변화의 기울기를 이용하면 해결할 수 있다. 즉, 현재 추정된 SOC의 값과 이전에 추정된 SOC 값의 증감을 식(5)와 같이 계산하여, 추정된 SOC값이 SOC 60~80%의 구간과 80~100%의 구간 중 어디에 속하는지 결정함으로써 두 개의 SOC 값 중 유용한 SOC의 해를 구분해 낼 수 있다.

$$\frac{\Delta\tau}{\Delta SOC} = \frac{\tau_{old} - \tau_{new}}{SOC_{old} - SOC_{new}} \quad (5)$$

5. 결 론

향후 휴대용 전자기기를 비롯하여 하이브리드 자동차 또는 순수 전기 자동차등의 응용에 광범위한 사용이 기대되는 리튬 폴리머 전지의 충전상태 추정하기 위한 새로운 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 EIS 실험을 통해 배터리의 AC 임피던스 스펙트럼을 측정하고 등가모델을 이용해 파라미터를 추출하였고 모델의 파라미터와 SOC와의 상관관계를 분석하였다. 분석한 결과 Time Constant를 이용하면 리튬 폴리머 전지의 SOC를 정확히 추정할 수 있음을 알 수 있었으며, 서로 다른 제조사가 만든 배터리에 문제없이 적용되어 98%이상의 정확도로 SOC를 추정할 수 있음을 보였다. 추후 제안된 방법을 구현하기 위한 간단한 하드웨어를 개발하고 알고리즘을 간략화 하여 실제 배터리에 적용 가능한 회로 및 알고리즘을 개발할 계획이다.

본 과제(연구)는 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성사업으로 수행된 결과임

참 고 문 헌

- [1] Walter A. van Schalkwijk, Bruno Scrosati, "Advances in Lithium-Ion Batteries", Kluwer Academic Publishers, 2002.

- [2] M. Broussely and G. Pistoia, "Industrial Applications of Batteries", Amsterdam, 2007.
- [3] V. Pop, H. J. Bergveld, D. Danilov, P. P. L. Regtien, P. H. L. Notten, "Battery Management Systems", Philips Research book Series, Vol. 9, 2008.
- [4] 최해룡, 반한식, 목형수, 신우석, 고장면, "리튬폴리머전지의 충/방전 특성해석을 위한 전기적 모델링에 관한 연구", *전력전자학회 논문지*, Vol. 5, No. 5, pp. 435-442, 2000.
- [5] Bhangu, P. Bentley and C. Bingham, "Nonlinear observers for predicting state-of-charge and state-of-health of lead-acid battery for hybrid-electric vehicle", *IEEE Trans. Vehicular technology*, Vol. 54, No. 3, pp. 783-794, 2005, May.
- [6] Jaemoon Lee, Oanyong, B. H. Cho, "Li-ion battery SOC estimation method based on the reduced order extended Kalman filtering", *Journal of Power Sources*, Vol. 174, pp. 9-19, 2007.
- [7] G. L. Plette, "Extended kalman filtering for battery management system of LiPB-based HEV battery packs - Part 2. modeling and identification", *Journal of Power Source*, Vol. 134, pp. 262-276, 2004, Aug.
- [8] G. L. Plette, "Extended kalman filtering for battery management system of LiPB-based HEV battery packs - Part 3. State and Parameter Estimation", *Journal of Power Source*, Vol. 134, pp. 277-292, 2004.
- [9] 이주형, 최우진, "전기화학적 전력기기의 모델링을 위한 저가형 임피던스 분광 시스템의 개발", *전력전자학회 논문지*, Vol. 13, No. 1, pp. 46-54, 2008, Feb.
- [10] R. Shalini, N. Munichandraiah, A.K. Shukla, "AC impedance and state-of-charge analysis of a sealed lithium-ion rechargeable battery", *Journal of Solid State Electrochem* 3, pp. 397-405, 1999.
- [11] T. L. Kulova, V. A. Tarnopol'skii, A. M. Skundin, "The Impedance of Lithium-ion Batteries", *Russian Journal of electrochemistry*, Vol. 45, No. 1, pp. 38-44, 2009.
- [12] Abderrezak Hammouche, Eckhard Karden, Rik W. De Doncker, "Monitoring state-of-charge of Ni-MH and Ni-Cd batteries using impedance spectroscopy", *Journal of Power Sources*, Vol. 127, pp. 105-111, 2004.
- [13] N. Munichandraiah, "Electrochemical impedance studies of a decade-aged magnesium/manganese dioxide primart cell", *Journal of APPLIED Electrochemistry*, Vol. 29, pp. 463-471, 1999.
- [14] C. C. Chan, E. W. C. Lo, S. Weixiang, "The Available Capacity Computation Model Based on Artificial Neural Network for Lead-Acid Batteries in Electric Vehicles", *Journal of Power Sources*, 87, pp. 201-204.
- [15] Grewal S and Grant D A, "A novel technique for modelling the state of charge of lithium ion batteries using artificial neural networks", *Proc. Int. Telecommunications Energy Conf. (IEEE)*, No 484, 2001, 14-18.
- [16] Alvin J. Salkind, Craig Fennie, Pritpal Singh, Terrill Atwater, David E.Reisner, "Determination of state-of-charge and state-of-health of batteries by fuzzy logic methodology", *Journal of Power Sources*, Vol. 80, pp. 293-300, 1999.
- [17] Pritpal Singh, Ramana Vinjamuri, Xiquan Wang, David Reisner, "Fuzzy logic modeling of EIS measurements on lithium-ion batteries", *Electrochimica Acta*, Vol. 51, pp. 1673-1679, 2006.
- [18] IEC 62133, "Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes - Safety requirements for portable sealed secondary cells, and for batteries made from them, for use in portable applications", 2005.
- [19] Dong-Won Park, Myung-Woo Chung, Song-Joo Lee, Yong-Kook Choi, "Studies on Property of Li Salt-Organic Electrolytes Adding Ethyl Acetate", *Journal of the Korean Chemical Society*, Vol. 52, No. 6, 2008.
- [20] S. Buller, "Impedance-Based Simulation Models for Energy Storage Devices in Advanced Automotive Power Systems", *Dissertation, RWTH Aachen*, ISBN 3-8322-1225-6, 2002.
- [21] Alvin J. Salkind, Pritpal Singh, A. Cannone, Terrill Atwater, Xiquan Wang, David Reisner, "Impedance modeling of intermediate size lead-acid batteries", *Journal of Power Sources*, Vol. 116, pp. 174-184, 2003.
- [22] J. R. Macdonald, "Impedance Spectroscopy", A John Wiley & Sons, Inc. Publication, 1987.
- [23] Andreas Jossen. "Fundamentals of battery dynamics", *Journal of Power Sources*, Vol. 154, pp. 530-538, 2006.

저 자 소 개



이종학(李鍾鶴)

1984년 7월 15일생. 2009년 숭실대 전기공학부 졸업. 2009년~현재 동 대학원 전기공학부 석사과정.



김상현(金尙鉉)

1981년 7월 14일생. 2008년 숭실대 전기공학부 졸업. 2008년~현재 동 대학원 전기공학부 석사과정.



김욱(金旭)

1981년 6월 10일생. 2008년 숭실대 전기공학부 졸업. 2008년~현재 동 대학원 전기공학부 석사과정.



최우진(崔宇鎭)

1967년 1월 7일생. 1990년 숭실대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 Texas A&M University 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1995년~1998년 (주)대우중공업 중앙연구소 전자기술실. 2005년~현재 숭실대 전기공학부 조교수. 당 학회 국문지/JPE 편집위원.