

리튬폴리머전지의 충/방전 특성해석을 위한 전기적모델링에 관한 연구

崔海龍, 潘漢植, 睦亨洙, 申玪錫, 高章勉

A Study on Electrical Modeling for Charge/Discharge Analysis of Li-Polymer Battery

Hae-Ryung Choi, Han-Sik Ban, Hyung-Soo Mok, Woo-Seok Shin, Jang-Myoun Ko

요 약

리튬폴리머전지의 전기적인 특성을 평가하고 이것을 시스템 측면에서 고찰할 수 있는 이론적인 토대를 마련하기 위하여 본 논문에서는 전지의 전기적인 특성평가를 위한 전기적모델링 기법에 관하여 고찰하였다. 실제 제작된 리튬폴리머전지의 특성자료를 바탕으로 R-L-C 모델을 이용한 동적해석방식과 PSpice 모델을 이용한 정적해석방식을 통하여 리튬폴리머전지의 전기적특성을 해석하였다. 각 모델의 충/방전시의 전기적특성을 고찰하고 충/방전조건에 따른 전지의 단자전압등 특성변수의 변화를 실제 제작된 리튬폴리머전지와 비교, 검토하여 그 타당성을 검증하였다.

ABSTRACT

Started upon its discovery by Wright et al in 1973, studies on the solid polymer electrolyte are being carried out vigorously. So, models of Li-polymer battery have been developed through R-L-C components combination and PSpice functional block in this paper. The impedance characteristics of Li-polymer battery with R-L-C components are presented. Simulation results using PSpice functional model are compared with measured charge/discharge characteristics. Also, as to the number of cycle(charge/discharge), coulomb efficiency of Li-polymer is evaluated through experimental results.

Key Words : Li-polymer battery, dynamic model, static model, PSpice, AC impedance

1. 서 론

최근 휴대용 기기나 통신기기 및 대용량 축전지를 이용한 시스템의 사용이 급증하고 있다. 아울러 무정전, 고품질의 전력을 수용가측에 공급하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 여기에는 반드시 대용량의 축전지가 요구되지만 지금까지 개발된 2차전지의 특성상 대형화에 큰 한계를 보임으로서 그 대안으로서 3가지 유형의 2차 전지(NiCd, NiMH 그리고 Li-ion)가 부각되고 있다. 그러나 용량증대와 안전성 향상 그리고 보다 박형의 전지에 대한 요구가 증가되었고 가장 유망한 대안으로서 리튬폴리머전지에 대한 관심이 집

중되고 있다.^{1) 3)} 리튬폴리머전지의 기본적인 특성은 리튬전지에 사용되는 액체 전해물질대신 고체의 전해물질을 사용한다는 것이다. 고체고분자 전해질 리튬전지(LPB : Lithium Polymer Battery)는 정극, 부극, 고체고분자 전해질(SPE : Solid Polymer Electrolyte)로 구성되어 있으며 정극은 물질로는 금속화합물, 부극은 물질로는 리튬, 리튬-알루미늄 합금 혹은 탄소, 전해질로는 고분자 전해질로 구성되어 있다. 특히 납이나 카드뮴 등의 중금속오염물질을 함유하지 않으므로 환경오염을 유발시키지 않는 고성능의 신형 리튬 2차 전지이다. 리튬폴리머전지는 고체고분자 전해질을 사용함으로써 박막전지의 제조가 가능하고 액체전해액을 사

용하는 리튬이온전지에서 문제될 수 있는 누액이 발생하지 않고 전지형상의 디자인을 자유롭게 할 수 있으며 박막전지의 적층으로 대용량전지의 개발이 용이한 장점을 갖고 있다. 그러나 아직까지 그 전기적인 특성을 분석하고 전지의 충/방전상태를 진단하기 위한 정량적인 기법의 부재로 인하여 전지 및 충/방전 장치의 설계 및 제작에 많은 애로가 발생하게 된다.^[4] 따라서 본 연구에서는 리튬폴리머전지의 특성해석을 위한 전기적모델링을 제시하였다. 아울러 고에너지 밀도, 수명 연장 및 안전성을 확보하기 위하여 양극에는 리튬금속산화물, 음극에는 탄소 및 고분자 전해질을 이용하여 리튬폴리머전지를 구현하였다. 이를 통하여 리튬폴리머전지를 포함한 에너지저장시스템의 전기화학적 특성 해석 및 충전용 전력변환장치를 설계 개발함에 있어 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 리튬폴리머전지의 구조 및 충/방전특성

2.1 리튬폴리머전지의 구조적 특성

고분자물질을 전해질로 사용한 전지는 크게 다음과 같이 두 가지로 나뉠 수 있다. 첫 번째는 순수한 고체 고분자물질의 전해질로 구성된 전지이고 또 하나는 망(network)구조 혹은 젤(gel)-고분자물질의 전해질로 구성된 전지이다. 전자의 경우는 일반적으로 용매의 증착막(evaporating coating)기법을 이용함으로써 얇은 필름 막의 구조가 가능하며 후자의 경우는 전지의 주변에 높은 이온 전도성(ionic conductivity)의 특성을 지니며 고분자물질의 모체에 액체의 용매와의 결합을 통해 가능해진다. 그림1은 리튬폴리머전지의 구조를 나타내며 모두 다섯종류의 물질의 결합으로 구성된다.

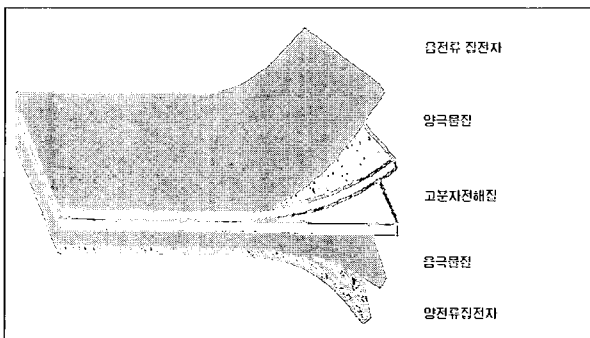
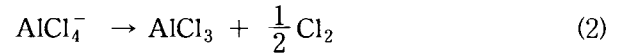
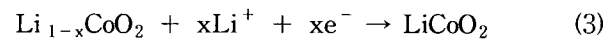


그림 1 리튬폴리머전지의 구조
Fig. 1 Configuration of Li-polymer battery

A. 충전 반응

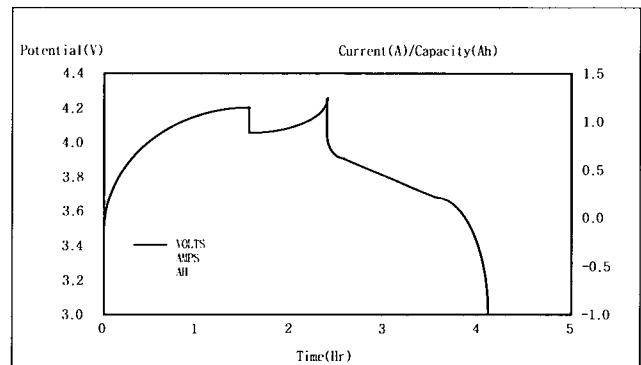


B. 방전 반응

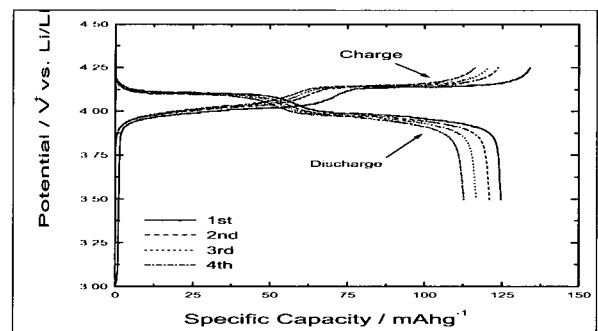


여기서 x는 가역량(reversible amount)

본 논문에서 고찰한 리튬폴리머전지의 충방전과정에서 일어나는 주된 반응을 화학식으로 표현하면 식(1)-(3)과 같으며 식(1)과 (2)는 충전시에 그리고 식(3)은 방전시에 나타나게 된다. 이 중 반응 (1),(3)은 가역적인 전극 반응인 반면 반응 (2)는 부반응으로서 충/방전효율을 낮추는 주된 원인이 된다. 반응 (2)는 기존의 Li/SO₂ 이차전지에서 염화가역구조(chlorine



(a) 시간에 따른 충/방전특성



(b) 전지용량에 따른 충/방전특성
그림 2 리튬폴리머전지의 충/방전특성
Fig. 2 Charge/discharge characteristics

shuttle mechanism)에 의해 전기화학반응과 화학반응이 결부된 과충전 방지기능을 하는 반응이다. 이 반응은 LiCoO₂를 양극으로 사용한 전지 시스템에서는 전해질을 구성하는 염인 LiAlCl₄가 분해된 후 화학적으로 다시 LiAlCl₄로 회복되므로 전해질의 분해라는 측면에선 별 문제가 발생하지 않지만 AlCl₄⁻가 분해될 때 발생하는 AlCl₃와 Cl₂는 강력한 산화제로서 양극 활물질인 LiCoO₂의 Co이온을 화학적으로 산화시켜 국부적인 구조파괴가 일어나며 이렇게 파괴된 국부구조의 영역은 다시 가역적인 전기반응을 수행하지 못하므로 비활성상으로 남게되며 또 용해성이 강한 기체가 발생하면서 활물질, 도전체와 바인더로 구성된 전극의 접촉저항이 증가하는 등의 양극열화에 의한 용량감소의 원인이 되는 것으로 생각할 수 있다.

그림2는 리튬폴리머전지의 충/방전특성을 나타내고 있으며 (a)에서는 충/방전의 시간특성을 표현하고 있으며 전지의 전압, 용량 및 충/방전전류의 특성을 나타내고 (b)에서는 실험적 자료에 기초한 전지전압 대 전지용량간의 특성을 나타내고 있다. 리튬폴리머전지는 다른 전지들과 마찬가지로 충/방전심도에 따라 단자전압이 큰 영향을 받게되는데 반복된 충/방전특성 결과를 종합한 결과 충/방전조건에 따라 전지의 내부저항이 변하는 특성을 고찰 할 수 있으며 이러한 영향을 관계식으로 표현하면 식(4)와 같다. 전지의 특성을 결정짓는요소는 내부저항인 R_b 와 내부 등가인덕턴스인 L 이며 내부저항은 충방전용량에 의존적인 특성을 나타내며 인덕턴스는 CC(정전류)운전모드에서 전지내부에 발생하는 열특성을 나타낸다.

$$R_b = kC \quad , \quad v_{battery} = V_{rate} + R_b(i_b) + \omega Li_b \quad (4)$$

여기서, R_b : 전지내부등가저항 k : 관계계수

C : 충/방전용량 i_b : 충/방전전류

L : 전지내부 등가인덕턴스

충/방전이 계속됨에 따라 충/방전효율이 감소됨을 알 수 있으며 이것은 전지의 충/방전성능을 평가하는 지표로 사용되며 식(5)와 같이 정의한다.

$$\eta = \frac{\text{한 cycle에서 방전할 때 뽑아낼 수 있는 전하량}}{\text{한 cycle에서 충전할 때 필요한 전하량}} \times 100 \quad (5)$$

3. 충/방전특성해석을 위한 모델링

3.1 동적모델

리튬폴리머전지의 등가모델에는 두 가지의 특성이 고려되어야 한다. 먼저 전지의 충/방전에 관한 특성이고 또 다른 하나는 전지 내부저항에 관한 특성이다. 일반적으로 사용되는 방식은 전지의 용량을 커패시턴스로, 내부임피던스효과를 저항으로, 그리고 전지의 주파수별 임피던스 특성변화를 인덕턴스로 표현하는 동적모델을 이용하는 방식이다.^[5] 이 방식은 순수한 전기적 모델이므로 전지의 용량, 방전특성, 및 내부저항에 관해 근사한 특성을 표현할 수 있고 여타 전기회로와의 결합을 통한 시스템의 성능평가가 용이한 장점을 지닌다. 그림3과 같은 등가회로가 매개변수 조정방식의 전지특성의 근사화를 통해 리튬폴리머전지의 등가회로로 사용될 수 있으며 이러한 전지 등가회로의 전달함수[식(6)]를 통한 주파수특성은 실제로 제작된 전지의 교류해석결과와 비교했을 때 매우 유사한 특성을 확인할 수 있다. 그림4는 전지의 임피던스성분을 유효분과 무효분으로 나누어 주파수 분석한 결과로서 임피던스의 무효분이 약60[Hz]에서 가장 작은 값을 나타내고 있다.

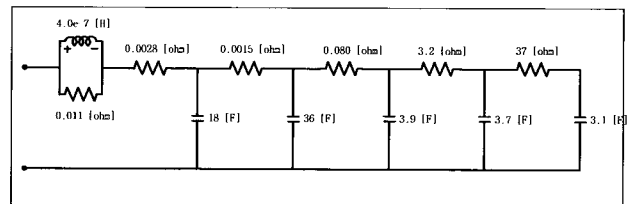


그림 3 리튬폴리머전지 동적모델 예

Fig. 3 Example dynamic model of Li-Polymer Battery

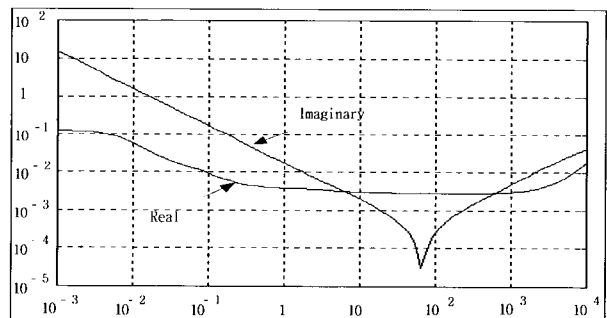


그림 4 임피던스특성

Fig. 4 Impedance characteristics

$$G(s) = \frac{V_{battery}}{I_{charge}} \quad (6)$$

$$= \frac{a_1s^6 + a_2s^5 + a_3s^4 + a_4s^3 + a_5s^2 + a_6s^1 + a_6}{b_1s^6 + b_2s^5 + b_3s^4 + b_4s^3 + b_5s^2 + b_6s^1}$$

그러나 이러한 방식은 열특성과 용량특성 같은 전지 내부의 고유특성들을 정밀하게 고려하는데 한계를 지니고 있다. 따라서 이러한 전지의 고유특성을 해석하기 위하여 정적모델에 의한 해석이 병행되어야 한다.

3.2 정적 모델

전지의 충방전 특성 진단을 위한 또 하나의 방식은 전지에 대한 모델링에 상용 시뮬레이션 프로그램을 이용하는 방식이며 이 방식은 각각의 전지특성 블록을 정의함으로써 그 모델을 구성하게 된다. 우선적으로 PSpice를 이용한 정적모델의 선정이 요구되며 고려되어야 할 변수로는 다음과 같다.

1. 셀의 용량
2. 시간에 따른 셀용량 감소량
3. 셀의 온도
4. 셀의 저항
5. 개방회로의 셀 전압

여기서 사용되는 리튬폴리머전지의 모든 변수는 실제 전지의 사양이 그대로 이용되며 특히 전지의 방전율, 셀의 저항은 실제 리튬폴리머전지의 데이터를 그대로 이용하게 된다. 여기서 사용되는 데이터는 전지의 특성변수의 오차를 고려하여 실측된 데이터들의 평균값을 취하게 된다. 그림5은 리튬폴리머전지의 정적 모델의 예를 나타내며 이러한 기능적인 블록을 통하여 전지의 충/방전특성 등과 같은 전지 고유의 특성표현이 가능하다. 그림5-(a)는 전지의 용량과 전압 방전율을 정의하며 실측된 데이터가 분석을 위하여 사용된다. 그림5-(b)는 이러한 방전상태를 관측하면서 방전시 지연시간을 설정한다. 마지막으로 그림5-(c)는 전지의 내부저항을 포함하고 전지의 출력을 나타낸다. 이때 모델의 구성요소는 다음과 같다.

- 셀의 A-H 용량을 나타내는 커패시터
- 용량 감소율을 결정하기 위한 방전율
- 셀의 방전을 위한 회로
- 셀 전압 대 충전상태에 대한 록업-테이블
- 셀 저항

이 방식은 앞서 설명한 R-L-C 소자로 구성된 동적 모델 보다 복잡한 단점을 지니지만 충/방전 상태에 관하여 자세한 모델링이 가능하고 특히 전지 내부특성에 관한 모델링이 가능한 장점을 지닌다.

4. 시뮬레이션

시뮬레이션은 R-L-C성분으로 구성된 동적모델과 시뮬레이션 프로그램인 PSpice를 이용한 정적모델을 이용하여 각각 리튬폴리머전지의 특성을 분석하였다. 먼저 제시된 동적모델을 이용하여 실제 전지의 충/방전 특성을 근사화하였다. 정적모델은 본 연구에서 제작된 리튬폴리머전지 실험을 통해 얻어진 데이터를 바탕으로 그림5에 제시된 모델을 이용하여 특성을 분석하였다. 표1은 본 연구에서 사용된 시뮬레이션 조건을 나타낸다. C-cell capacitor는 전지의 고유 단위셀 용량을 나타내고 fudge factor는 전지마다의 고유의 계수로서 특성보정을 위하여 사용된다. 이러한 조건하에서 동적 모델을 이용하여 충방전 모의 시뮬레이션을 수행한 결과가 그림6에 나타난다. 충/방전을 반복적으로 수행함에 따라 각각 1C, 0.5C 그리고 2C 등 충/방전용량이 클수록 충방전 심도가 커지는 현상을 보인다.

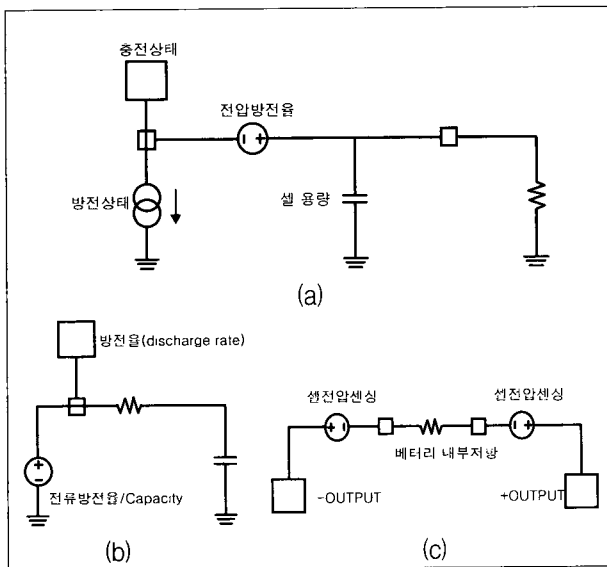
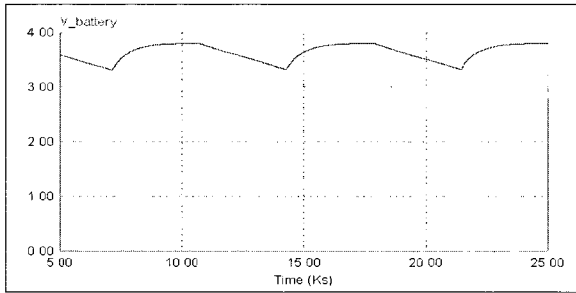


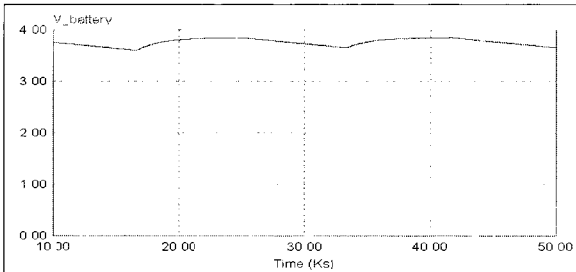
그림 5 리튬폴리머 전지의 정적모델 예
Fig. 5 Example static model of Li-Polymer battery

표 1 시뮬레이션조건
Table 1 Simulation Condition

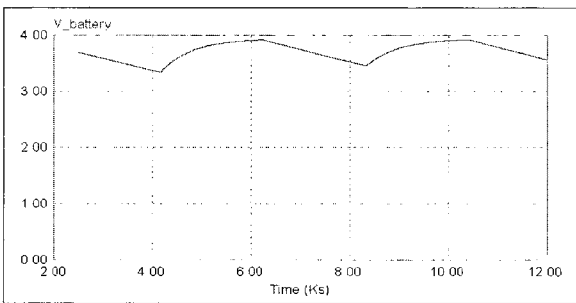
	리튬폴리머전지
C-cell capacity	1Ah,4.1Wh
정격전압	4.1V
온도	상온
fudge factor	1.1



(a) 1C 충전 / 1C 방전



(b) 0.5C 충전 / 0.5C 방전



(c) 2C 충전 / 2C 방전

그림 6 동적모델의 충/방전특성
Fig. 6 Charge/discharge characteristics of dynamic model

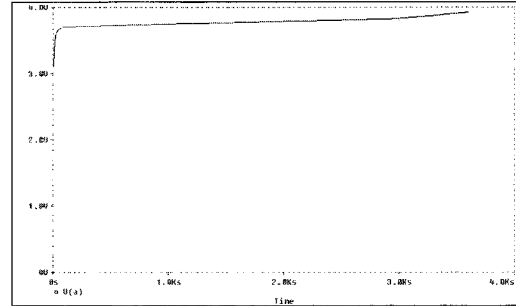
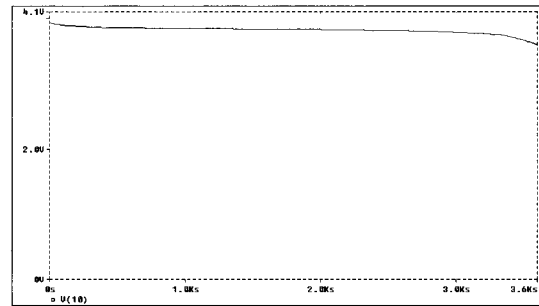
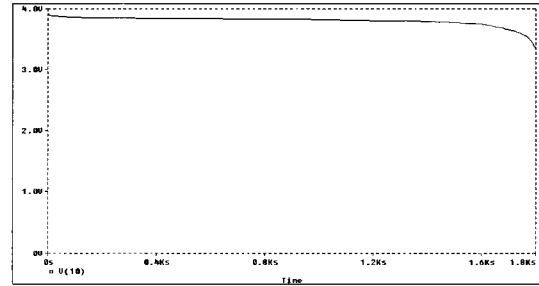


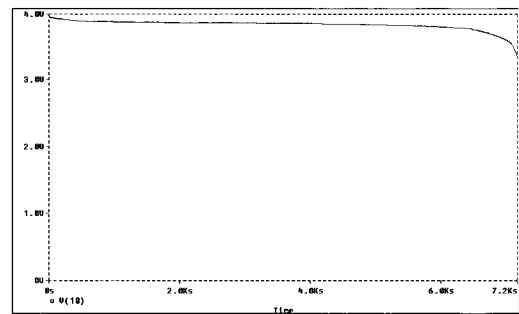
그림 7 정적모델의 충전시 시간-전지전압 특성
Fig. 7 Time versus voltage characteristics of static model during charging



(a) 방전조건 : (1C)



(b) 방전조건 : (2C)



(c) 방전조건 : (0.5C)

그림 8 정적모델의 방전조건별 시간-전지전압 특성
Fig. 8 Time versus voltage characteristics of static Model during discharging

전반적인 충/방전 특성을 충분히 표현할 수 있지만 온도특성등 셀의 좀더 정확한 개루프 전압특성을 표현하기에는 충분하지 않음을 알 수 있다. 그림7과 8은 정적모델을 이용한 리튬 폴리머 전지의 시간에 대한 전지의 충방전 전압특성으로서 부하의 크기에 따라 전지전압의 크기와 방전율이 결정되며 절점 전압까지 거의 선형적으로 방전을 지속하게 되며 실제 전지의 절점부근에서의 특성이 그대로 나타난다. 여기서 cut-off 지점은 일반적으로 특성곡선의 절점을 선택한다. 물론 방전이 이 지점을 지나서 계속될 수 있으나 그러한 경우에는 전지의 이론적인 정격보다 작은 용량특성을 나타낸다. 이 cut-off 지점은 과충전 혹은 과방전시 더 짧아지거나 더 길어지는 특성을 나타낸다.

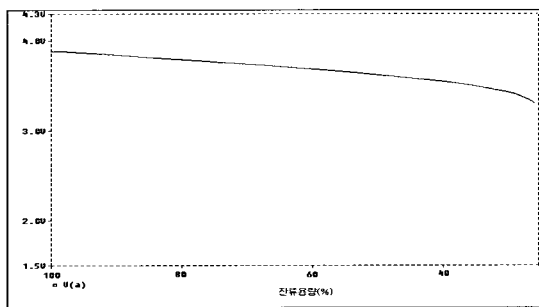


그림 9 정적모델의 방전용량-전지전압 특성
Fig. 9 Capacity versus voltage characteristics of Static Model during discharging

그림9는 방전시 리튬폴리머전지의 전지용량과 전지 전압간의 관계를 나타내며 여기서 나타나는 전지용량은 충전 혹은 방전의 심도가 깊어짐에 따라 저하되는 특성을 나타내는데 전지의 유효용량이 고분자 전해물질의 확산정도에 의해 제한되기 때문이다.

5. 리튬폴리머전지의 특성실험

PAN(polyacrylonitrile)을 기초로 한 폴리머 전해 겔(gel)이 준비되었고 이것은 PAN, ethylene carbonate, diethylene carbonate, 리튬 perchlorate의 합성물로 구성되어 있다. 복합폴리머전해질은 PP(polypropylene)을 기초로 한 non woven 섬유질에 PAN 겔을 섞어 넣음으로서 구성된다. 최종적인 필름의 두께는 110-130um이며 여기서 PP의 무게 비율은 5-12 weigh percent 이다. 음극과 양극 그리고 셀은 건조된 조건하에서 준비된다. 양극은 고분자물질의 접합제로써 crystalline

carbon을 사용한다. 음극은 삽입 합성물인 $LiCoO_2$ 와 함께 동일한 접합제를 포함시켰다. 전극은 고온에서 압착되었다. 양극, 합성고분자 전해질 그리고 음극은 보통의 압력으로 샌드위치 되었다. 셀전체는 진공화된 금속화 플라스틱 케이스로 밀봉되었다. 셀의 사이즈는 $4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ 이다. 셀은 일정한 전류로 4.15V의 목표전압까지 그리고 2.8V의 절점전압까지 충/방전(0.2mA/Cm²)된다. 여기에는 POWER TECH의 자동제어기가 사용되었다. 표2는 실험에 사용된 전지의 특성 나타낸다.

표 2 전지특성
Table 2 Battery Characteristics

정격충전용량(mAh) - 100mAh at 0.2C(20mA), 25C
전지전압(V) - (2.8V- 4.1V)
규격(mm)-[두께:0.65/ 폭:40/ 길이:70]
충전방식 - 정전류/정전압 방전방식 - 정전류
음극물질 - LiCoO₂
양극물질 - 흑연 (graphite)

리튬폴리머전지의 충/방전특성은 용량의 증대효과를 제외하고 기존의 리튬이온전지의 충/방전특성과 매우 유사한데 전지의 내부저항과 용량특성을 가장 중요하게 고려한다. 그림10,11,12는 리튬폴리머전지의 방전특성을 나타내며 방전조건에 따라 충전전류의 양이 결정되는 특성을 나타내고 있다. 그림13은 충전시 전지의 용량과 전압간의 관계를 나타내고 있다. CC(정전류)충전조건에 따라 초기에 급속히 충전이 이루어 지는 것을 알 수 있다.충전은 정전압/정전류(CV/CC)조건하에서 이루어지며 원래의 전지의 정격용량(100mA)에 도달함에 따라 정격전압에 이르게 된다. 따라서 완전방전상태에서는 0.8-2C로 충전하고 완전충전이 되어감에 따라 충전전류를 서서히 감소시키게 된다. 특히 리튬폴리머전지는 과충전시 상대적으로 내부저항이 증가하는 특성으로 인하여 전지에 악영향을 미치게 되므로 완전충전에 이르렀을 때 과충전방지를 위한 충전전류 제어가 요구된다. 충전과정은 제조한 단위전지에 대해서 3.5 - 4.3V의 범위로 0.1-2C의 조건으로 수행되었으며 정전류정전압 (CC/CV, Constant Current, Constant Voltage)의 조건하에서 충전되었다. 초기충전에서 약 13mAh/g의 충전용량을 보여 보고된 폴리머 전지에 비해 높은 에너지 밀도를 나타낸다.^[5]

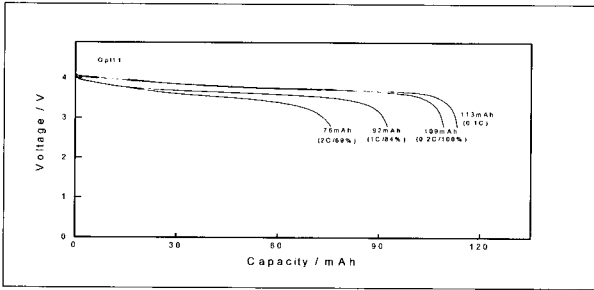


그림 10 방전시 용량-전지전압 특성
Fig. 10 Characteristics of capacity versus voltage during discharging

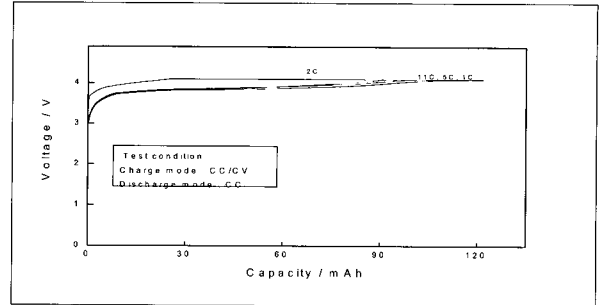


그림 13 충전시 용량-전지전압 특성
Fig. 13 Characteristics of capacity versus voltage during charging

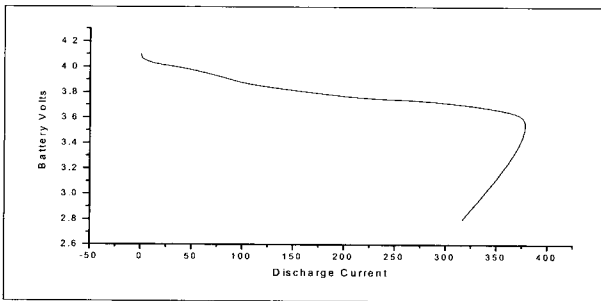


그림 11 방전전압-방전전류 특성
Fig. 11 Characteristics of voltage versus current during discharging

전지의 효율은 충전과 방전이 한번 일어날 때 충전 시 필요한 전하량과 또한 방전시 뽑아낼 수 있는 전하량의 비로 정의하며 리튬폴리머전지의 충/방전 cycle 당 효율특성은 그림14와 같다.

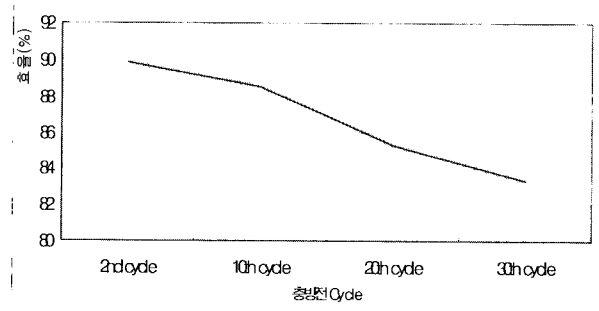


그림 14 효율특성
Fig. 14 Efficiency characteristics

방전과정은 이미 충전된 전지에 임의의 부하조건에 따라서 수행되며 역시 수 차례의 충/방전과정을 통하여 방전용량의 저감특성을 고찰함으로써 그 특성을 평가한다. 초기에 급속히 단자전압이 떨어지는 특성을 볼 수 있으며 앞서 시뮬레이션에서도 이 영역에서의 특성을 고려하였다. 본 연구에서는 사용된 전지에 0.1-2C의 방전조건으로 방전할때 4회 충/방전 주기 후의 방전용량은 116mAh/g을 나타내었다. 이는 이미 발표된 통상적인 리튬폴리머전지(약100mAh/g)에 비해 높은 에너지 밀도특성을 지님을 알 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 리튬폴리머전지의 특성진단을 위한 전기적인 모델을 이용하여 분석하였고 특히 R-L-C 성분을 이용한 전기적 등가회로를 통한 전지임피던스 특성을 고찰하였으며 내부상태 진단 및 가장 효율적인 충/방전 주파수 운전조건을 확인하였다. 또한 상용 시뮬레이션 프로그램인 PSpice를 이용하여 리튬폴리머전지의 고유의 특성을 모델링 하였고 이러한 시뮬레이션 분석을 통하여 리튬폴리머전지의 주요 특성을 확인할 수 있었다. 이를 통하여 효율적인 충/방전조건을 결정하고 충/방전장치 개발시 충/방전제어의 조건을 제시할 수 있다. 또한 실제로 제작된 리튬폴리머전지의 특성분석을 통하여 앞서 분석된 전지의 특성과 함께 대용량전지시스템을 위한 대안으로서의 가능성을 확인

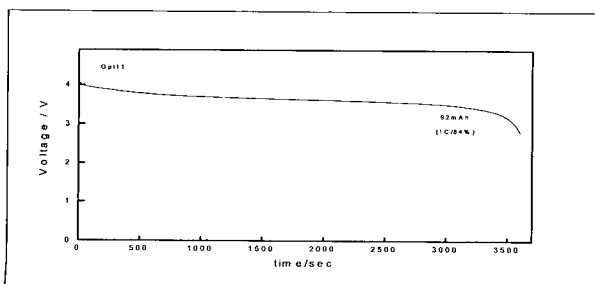


그림 12 방전시간-전지전압 특성
Fig. 12 Characteristics of time versus voltage during discharging

하였다. 향후 연구과제로는 리튬폴리머전지의 병렬운전시의 문제점 고찰과 온도특성에 민감한 리튬폴리머전지의 내부 및 외부 온도변화에 대한 이론적인 특성 해석이 필요하다.

본 연구는 1998년도 기초전력공학공동연구소 중기과제 연구비에 의하여 이루어 졌음.

참 고 문 헌

- [1] W. B. Gu, C. Y. Wang, B. Y. Liaw, "The use of computer simulation in the evaluation of electrical vehicle battery", Journal of Power Sources, pp. 151-161, 1998.
- [2] H. G. Zimmerman, R.G. Peterson "An Electrochemical Cell Equivalent Circuit for Storage Battery Power Syatem Calculations by Digital Computer", IECEC 1970 Proceedings. Vol. 6, pp. 6.33-6.39, 1970.
- [3] Wolfgang H. Meyer, " Polymer Electrolytes for Lithium-Ion Battery" Adv. Mater, No.6, 1998.10
- [4] John R. Miller " Advantages of battery/capacitor combinations for portable electronics" 16th International Seminar and Exhibit on Primary and Secondary Batteries" Ft. Lauderdale,FL, March 1-4, 1999
- [5] Bruno Scrosati " Conducting Polymers: Advanced Materials for New Design, Rechargeable lithium Batteries" Society of Chemistry Industry January 21, 1998

저 자 소개



최해룡(崔海龍)

1973년 4월 20일생. 1996년 건국대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



반한식(潘漢植)

1952년 1월 29일생. 1984년 건국대 전기공학과 졸업(학사). 1987년 동 대학원 졸업(석사). 1998년 3월~동 대학원 박사과정. 1982년~1999년 한국통신. 2000년 현재 하나로통신 산업개발(주)



목형수(睦亨洙)

1963년 10월 31일생. 1986년 서울대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1988년 동 대학원 졸업(석사). 1992년 동 대학원 졸업(공학박). 1992년~1996년 서울산업대 공대 제어계측 공학과 조교수. 현재 건국대 공대 전기공학과 교수.



신우석(申玆錫)

1961년 2월 9일생. 1986년 서울대 공대 전기 공학과 졸업(학사). 1988년 동 대학원 졸업(석사). 1996년 동 대학원 졸업(공학박). 1988년~1996년 금성사 생활시스템 연구소 선임연구원. 현재 두원공과대 전기과 부교수.



고장면(高章勉)

1961년 1월 11일생. 1995년 Ph d, 한국과학기술원 화학공학과. 1987년~1992년 한국과학기술원 고분자재료연구실 연구원. 1995년~1996년 한국타이어중앙연구소 신소재연구실 과장. 1996년~1997년 전력원구원 전력계통연구실 과장. 1997년~현재

대전산업대학교 조교수.