

리튬 2차 전지의 1차원 열적 특성을 고려한 지능형 용량예측

이정수†*, 호빈*, 김광선*, 임근욱**, 조장균**, 조현찬**

*한국기술교육대학교 대학원 메카트로닉스공학과, **한국기술교육대학교 대학원 전기전자공학과

Abstract

In this paper, in order to get the characteristics of the lithium secondary cell, such as cycle life, charge and discharge characteristic, temperature characteristic, self-discharge characteristic and the capacity recovery rate etc, we build a mathematical model of battery. In this one-dimensional model, Seven governing equations are made to solve seven variables c , c_s , Φ_1 , Φ_2 , i_2 , J and T .

The mathematical model parameters used in this model have been adjusted according to the experimental data measured in our lab.

The connecting research of this study is to get an accurate estimate of the capacity of battery through comparison of results from simulation and fuzzy logic system. So the result data from this study is reorganized to fit the fuzzy logic algorithm.

Key Words : Lithium secondary cell, Fuzzy Estimator, thermal modeling, FCC

1. 서론

리튬 2차 전지는 반도체 장비, 이동 통신 장치, 하이브리드 자동차등에 널리 쓰이고 있다. 특히 리튬 2차 전지의 정밀 상태 측정 및 예측, 제어문제는 이것을 장착한 시스템의 효율성까지 관여하므로 최근 중요한 연구 대상이 되고 있다. 리튬 2차 전지의 성능은, 사이클 라이프, 충·방전 특성 곡선, 온도 특성, 자가방전 특성(전하 보존율) 및 용량 회복율 등으로 결정 된다. 전지의 다양한 특성 중, 충·방전 횟수에 따른 사이클 라이프는 전지의 전하 저장 용량(FCC)을 감소시킨다. 또한, 전지의 방전 특성은 비선형적이다. 기존의 리튬 2차 전지의 잔량을 측정하기 위한 방법으로 첫 번째로는 전압을 주파수로 변환하여 주파수에 따라 전압을 모니터링 하는 방법이 있다. 또 다른 방법으로는 사이클 라이프의 카운트하고 전류를 가감하여 수치 연산을 통해 리튬 2차 전지의 잔량을 예측하고 있다. 이러한 방법들은 비선형적인 방전특성과 자가방전 특성, 이론 값과 다른 사이클라이프의 용량감소를 반영하지 못하기 때문에 정확한 잔량의 모니터링이 어렵다.[1,2]

본 논문에서는, 이러한 문제점 등을 해결하기 위하여 지능형 FCC(Full Charge Capacity) 추정 알고리즘을 제안하고 전지의 열적 모델링을 통해 배터리 SOC(State of Charge)를 얻는 제어 알고리즘을 제안한다. 또 기존의 열적 모델링 방법에서 좀더 향상된 방법을 도입함으로써 보다 정확한 예측을 제안한다.[3]

또한, 전지의 온도 특성에서 온도에 따라 배터리의 용량이 영향을 받고 배터리의 수명에 따라 용량의 변화가 생긴다.[1,2]

이러한 변화는 본 논문에서 제안하는 지능형 알고리즘인 퍼지 estimator와 열적 모델링을 이용하여 사이클 라이프와 온도 등에 의한 전지 용량의 감소를 계산하여 실험한 값과 퍼지 로직에 의한 결과 값을 비교하여 정확한 값을 얻을 수 있다.

† E-mail: cholab@kut.ac.kr

2. 리튬 2차 전지의 특성

실험을 통한 리튬 2차 전지의 충·방전 특성, 온도 및 사이클 라이프 특성, 자가방전 특성(전하 보존율) 및 용량 회복율 등을 살펴보면 충전은 정전류(constant Current : CC)로 충전하다가 전전압(Constant Voltage : CV)으로 충전하며, 방전에서의 방전전압은 일정하게 안정되어 있지 않음을 알 수 있다.

Fig.1, Fig.2는 리튬 2차 전지의 충·방전 특성을 나타낸다.

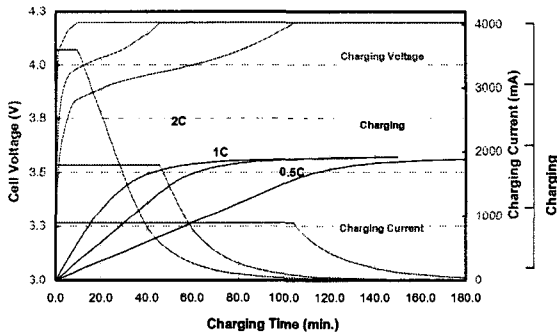


Fig. 1. Charge characteristic

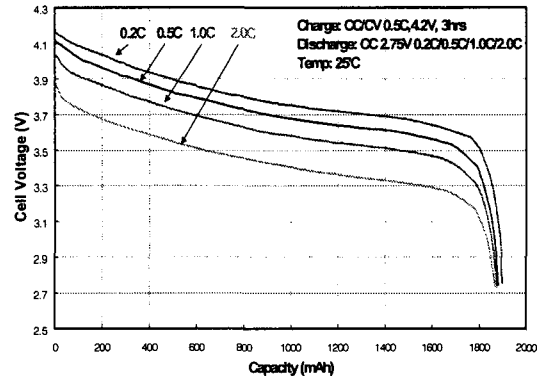


Fig. 2. Discharge characteristic

전지는 근본적으로 온도가 올라갈 수록 용량은 증대되지만, 사이클 라이프[Cycle life]는 급격히 떨어진다. 2차 전지는 충·방전을 계속하면서 용량이 줄어든다. 사이클 라이프[Cycle Life]는 초기용량의 80[%] 용량으로 용량이 줄어들었을 때까지의 충 방전 회수로 정의한다. Fig.3, Fig.4는 리튬 2차 전지의 온도 특성 및 사이클 라이프를 나타낸다.

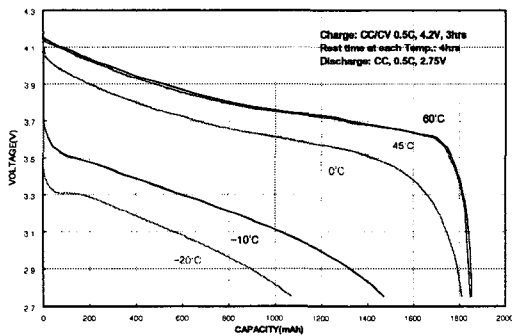


Fig. 3. Temperature characteristic[0.5C]

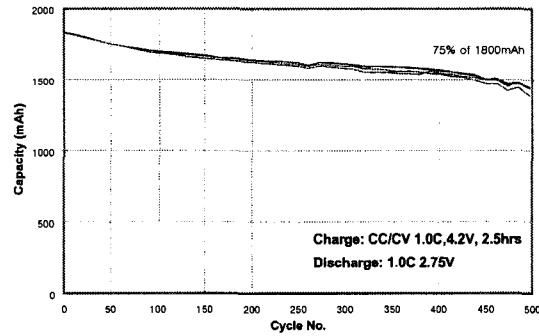


Fig. 4. Cycle life

리튬2차 전지의 화학반응에 의하여 용량이 줄어드는 현상을 자가방전(Self-discharge)이라고 하며, "Retention Capacity 또는 Charge Retention"와 "Recovered Capacity"가 평가 항목으로 장시간 방치 후 어느 정도의 용량이 없어지고 어느 정도의 용량이 남아있나를 표시하는 항목이다. Fig.5는 리튬 2차 전지를 충전 후 자가 방전 특성을 기록한 특성 곡선을 나타낸다.내며 다시 재충전하였을 때 초기 용량 대비 사용가능 용량을 나타내는 Recovery의 특성 곡선이다.

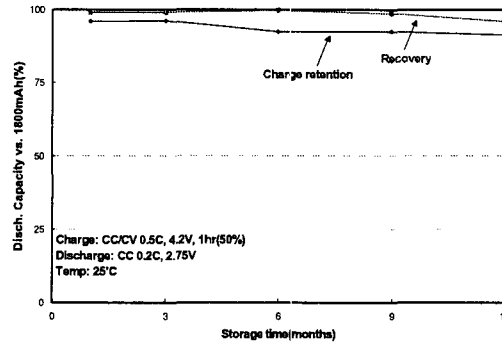


Fig. 5. Electric charge preservation rate and capacity recovery rate

3. 열적 모델링

Fig. 6은 양 쪽의 Current Collector에서 Current의 방향이 변하지 않는다고 가정한 1차원적인 연속체 모델이다.[4]

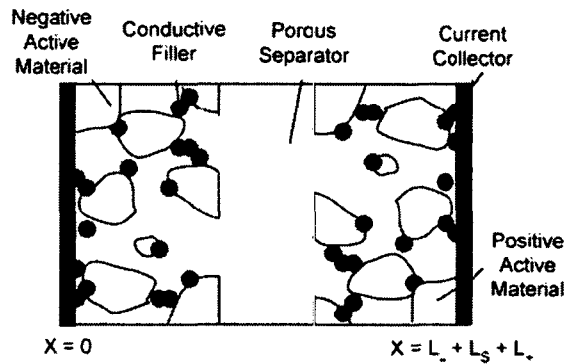


Fig. 6. Schematic of a lithium-ion battery

이 모델의 시간 변화에 대한 Cell Voltage, Current의 비선형적인 값과 Cell안에서의 시간과 위치에 대한 용해액과 전극의 상, 용질 농도, 리튬 농도의 반응율, 전극에서의 전류 밀도의 계산을 하는데 있어 근거가 되는 7개의 이론은 Concentration over-potential equation, Concentrated solution theory, Porous electrode theory, Ohm's law, Butler-Volmer kinetics, Thermodynamics theory, current and mass conservation이다.[5]

Potential in the electrolyte

$$\nabla \Phi_2 = -\frac{i_2}{\kappa} + \frac{2RT}{F} (1 - t_+^0) \left(1 + \frac{d \ln f_{\pm}}{d \ln c} \right) \nabla \ln c \tag{1}$$

Concentration over-potential equation에 의한 공식으로 Φ_2 는 용해액의 전압이고, κ 는 Bruggeman relation에 의해 결정된다.

Potential in the solid

$$I - i_2 = -\sigma \nabla \Phi_1 \tag{2}$$

Ohm's law에 의한 공식으로 I는 배터리에서의 전체 전류, i_2 는 용해액에서의 전류 밀도, Φ_1 는 유전체에서의 전압이다.

$$\varepsilon \frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot \varepsilon D \left(1 - \frac{d \ln c_0}{\ln c} \right) \nabla c + \frac{t_+^0 \nabla \cdot i_2 + i_2 \cdot \nabla t_+^0}{z_+ v_+ F} - \nabla \cdot c v_0 + a j_- \tag{3}$$

Transport in the electrolyte

Concentrated solution theory에 의한 공식으로 c 는 용해액에서의 용질 농도이다.

$$\frac{\partial c_s}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_s r^2 \frac{\partial c_s}{\partial r} \right) \text{Transport in the solid} \quad (4)$$

Porous electrode theory and mass conservation에 의한 공식으로 c_s 는 +전극에서의 리튬 농도이다.

$$i_n = i_0 \left[\exp\left(\frac{\alpha_a F(\Phi_1 - \Phi_2 - U)}{RT}\right) - \exp\left(\frac{\alpha_c F(\Phi_1 - \Phi_2 - U)}{RT}\right) \right] \text{Reaction rate} \quad (5)$$

Butler-Volmer kinetics에 의한 공식으로 i_n 은 활성 물질 표면에서의 전류 흐름, U 는 기준이 되는 리튬 전극에서의 열역학적 에너지이다.

Current balance

$$\nabla i_2 = \alpha i_n \quad (6)$$

Current conservation에 의한 공식으로 i_2 는 용해액에서의 전류 밀도이다.

$$\dot{Q} = IV + \int \sum \alpha_{n,i}(x) \left(U_i(c_s(x)) - T \frac{\partial U_i(c_s(x))}{\partial T} \right) dx + C_p \frac{dT}{dt} \text{Energy balance} \quad (7)$$

Thermodynamics theory에 의한 공식으로 \dot{Q} 는 외부로부터 시스템으로의 열 전달율이다.

식(1)~식(6)의 6개의 지배 방정식과 식(7)의 온도에 관한 방정식은 배터리의 전기화학적 특성을 설명하는데 필요하고, 6개의 종속변수(c , c_s , Φ_1 , Φ_2 , i_2 , j)와 온도(T)에 대한 문제를 동시에 해결한다. 시뮬레이션에 의한 결과는 Fig. 7의 퍼지 알고리즘의 일부로 FCC를 계산한다.

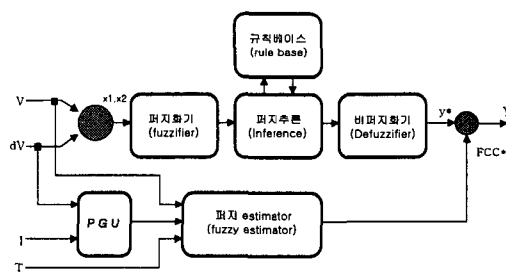


Fig. 7. Fuzzy algorithm

4. 지능형 용량 예측 알고리즘

4.1 퍼지 알고리즘

퍼지 알고리즘을 적용하기 위하여 알맞은 언어적 변수로 크리슘 입력을 변환 하고 2개의 입력과 1개의 출력으로서, V , dV 는 입력이고 RC 는 출력이다. 각 입력과 출력의 소속 함수는 Fig.8과 Fig.9, Fig.10로 나타낸다.

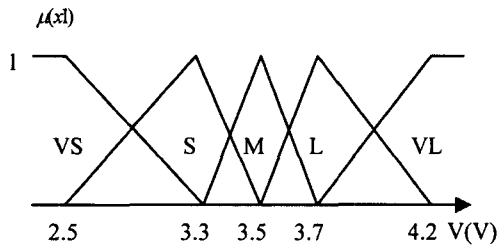


Fig. 8. V of membership function

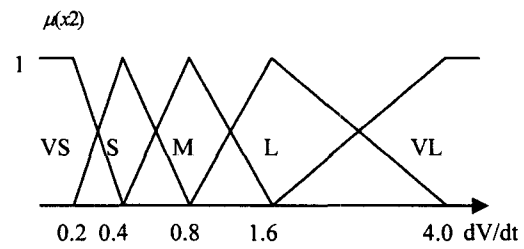


Fig. 9. dV of membership function

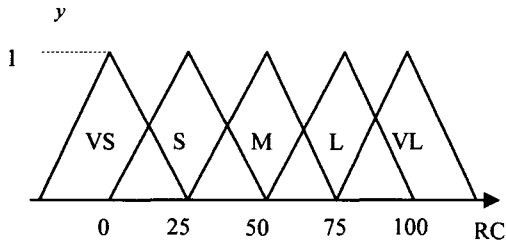


Fig. 10. RC of membership function

Table 1. declaration of linguistic variables for fuzzy logic

변수	VS	S	M	L	VL
정의	Very Small	Small	Medium	Large	Very Large

4.2 퍼지화기(Fuzzifier) 퍼지 룰(Fuzzy rules) 및 퍼지 추론(Fuzzy Inference)

Table 2는 출력 RC에 대한 퍼지 룰을 나타낸다. 퍼지 근사 추론(Fuzzy Approximate Reasoning)은 맘다니의 최소-최대 연산법(Mamdani's Max-min compositional rule)을 사용하여 퍼지 로직 알고리즘을 적용하였다.[6,7]

Table 2. Fuzzy rules

RC		V				
		VS	S	M	L	VL
dV	VS	S	M	L	VL	VL
	S	VS	S	M	L	VL
	M	VS	S	M	L	L
	L	VS	S	M	L	L
	VL	VS	S	S	M	L

4.3 비퍼지화(defuzzifier) 및 퍼지 Estimator

비퍼지화를 이용하여 잔량(Remain Capacity) 출력을 얻기 위하여, 다음과 같이 단순 무게 중심법(Simplified Center Of Gravity)을 사용하였다.[4,5]

$$y^{*COG} = \frac{\sum_{i=1}^5 \mu(y_i) \times y_i}{\sum_{i=1}^5 \mu(y_i)}$$

5. 컴퓨터 시뮬레이션 결과

Fig. 11은 열적 모델링을 통한 배터리 충방전시 특성 변화에 대한 시뮬레이션 결과이다.

시뮬레이션의 전기 화학적인 파라미터들은 HEV Battery Pack[8]의 연구와 실험적 데이터, 실험에서의 방법을 토대로 프로그램을 구동했다.

Fig. 11과 Fig. 12을 비교하면 비슷한 곡선을 그리고 있으나 오차가 발생하는 것을 알 수 있다.

이 오차는 실험과 시뮬레이션을 반복함으로써 개선할 수 있을 것이며, 개선된 시뮬레이션 결과는 추후 실제 시스템에 적용함에 있어서 그 효과가 발휘될 것이다.

상기와 같은 열적 모델링을 시뮬레이션하여 배터리 특성을 파악한 후 퍼지 알고리즘에 적용한다면 더 정확한 FCC를 예측할 수 있고 좀 더 효율적인 배터리 성능을 보일 수 있도록 제어 할 수 있다.

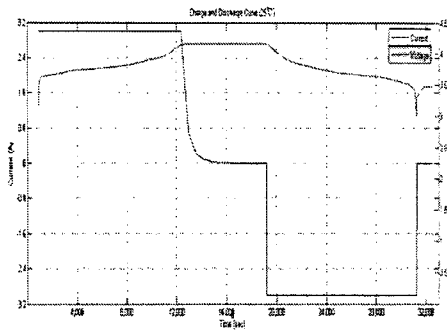


Fig. 11. Simulation result

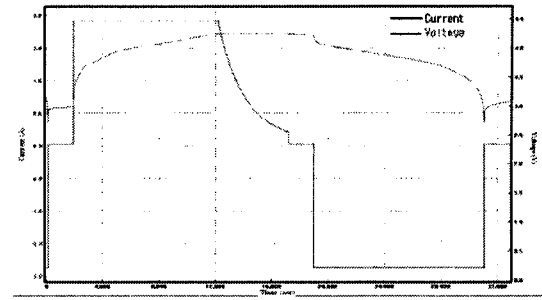


Fig. 12. Experiment result

6. 결론

리튬2차 전지가 가지고 있는 비 선형적인 방전 특성과 충방전을 통한 사용횟수의 증가, 자가방전 특성에 의한 리튬2차 전지의 전하 축적 공간 감소는 실제 전지의 용량을 제대로 예측하는데 있어 큰 어려움이었다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 극복하기 위하여 퍼지 알고리즘과 열적 모델링을 통하여 배터리의 잔량을 예측한다. 지능형 FCC 예측 알고리즘에서 열적 모델링을 고려하지 않고 단독적으로 퍼지 알고리즘만을 이용한다면 SOC의 정확성이 떨어진다. 배터리 제어에 있어 오차값은 효율성에 영향을 미친다. 때문에 퍼지알고리즘에 열적 모델링을 통한 시뮬레이션 결과를 적용하고 그 효율성을 살펴 보았다. 본 논문에서 다소 발생된 오차에 대해서는 보다 정확도가 높은 시스템을 제작하여 실험을 반복적으로 시행한다.

앞으로의 연구 방향은 정전류 부하와 실제 변화되는 부하를 사용하여 반복적인 실험을 통해 시뮬레이션의 정확도를 높이고, 이를 이용한 지능형 용량 예측 알고리즘의 정확도를 동시에 높이는 구체적인 연구를 시도할 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역혁신 인력 양성사업으로 수행된 연구 결과임.

참고문헌

- [1] Samsung SDI, Performances of the Cylindrical Li-ion ICR18650-18, 2000.
- [2] Byung-woo Jung, Intelligent Start Module Design for Lithium-ion Battery, FIP2003, ISSN7-302-06299-4, 2003.
- [3] 김종원, "리튬 2차 전지의 열적 모델링 및 용량 예측에 관한 연구", 반도체 및 디스플레이장비 학회지, 제6권, 제 1호, pp.53-57, 2007
- [4] C. Marc Doyle, "Design and Simulation of Lithium Rechargeable Batteries", PhD Dissertation, University of California, Berkeley, 1995.
- [5] K. E. Thomas, J. Newman, and R. M. Darling, "Modeling of Lithium Batteries," in: Advances in Lithium-Ion Batteries, B. Scrosati and W. van Schalkwijk, eds., New York : Kluwer Academic Publishers, 2002
- [6] Mohammad Jamshidi, Fuzzy Logic Control, Prentice Hall, 1993.
- [7] Valluru B. Rao and Hayagriva V.Rao, C++ neural networks and Fuzzy Logic, MIS press, 1993.
- [8] K. Smith, C.Y.Wang, "Power and Thermal Characterization of a Lithium-ion Battery Pack for Hybrid-electric Vehicles", Journal of Power Sources 106 pp.662-673, 2006.