

자율이동체를 위한 2차 전지의 확장칼만필터에 기초한 SOC 추정 기법

Secondary Battery SOC Estimation Technique for an Autonomous System Based on Extended Kalman Filter

전 창 완*, 이 유 미
(Chang-Wan Jeon and Yu-Mi Lee)

Abstract : Every autonomous system like a robot needs a power source known as a battery. And proper management of the battery is very important for proper operation. To know State of Charge(SOC) of a battery is the very core of proper battery management. In this paper, the SOC estimation problem is tackled based on the well known Extended Kalman Filter(EKF). Combined the existing battery model is used and then EKF is employed to estimate the SOC. SOC table is constructed by extensive experiment under various conditions and used as a true SOC. To verify the estimation result, extensive experiment is performed with various loads. The comparison result shows the battery estimation problem can be well solved with the technique proposed in this paper. The result of this paper can be used to develop related autonomous system.

Keywords : battery, extended Kalman filter, State of Charge(SOC), estimation

I. 서론

로봇과 같은 자율이동시스템의 핵심적인 요소 중의 하나가 전원공급이고, 전원을 공급하는 방법 중에 가장 선호되고 있는 방법이 계속적 충전이 가능한 2차 전지에 의한 방법이다.

2차 전지에 의해 전원 공급을 할 경우 효율적인 시스템 운영을 위해 2차 전지의 잔량을 정확히 추정하는 것이 필요하다. 이에 실패하여 방전 시까지 충전을 하지 않으면 전원이 고갈되어 자율이동시스템이 정지하는 사태가 벌어진다. 또한, 충전이 필요없는 상황에서도 잔량 추정을 잘못하여 필요 이상의 충전을 할 경우 시간이 낭비되고 번거로우며 나아가서는 2차 전지의 수명도 단축되는 결과를 초래해 경제적 손실을 가져오게 된다. 그러므로 2차 전지의 정확한 잔량 추정은 많은 시간적, 경제적 이득을 가져온다. 현재 많은 연구가 진행 중이며 전기 휠체어 및 우리나라에서도 향후 상용화 될 전기자동차 및 하이브리드 자동차의 경우에는 잔량 추정의 중요성이 더 부각되는 예라고 할 수 있다[14].

이 분야의 초창기 부터 잔량 측정을 위해 많이 사용된 방법은 여러 환경에서 반복적인 수많은 실험을 통해 얻어진 잔량 데이터를 테이블로 작성하여 실제 상황에서 그 환경에 맞는 잔량을 테이블을 통하여 얻는 방식이었다. 그러나 이러한 방법은 2차 전지의 종류가 달라질 때 마다 수 많은 실험을 수행해야 하는 번거로움이 있고, 테이블을 저장하는 메모리 공간이 많이 소요되며 같은 종류라도 조금씩 다른 특성을 나타내는 2차 전지의 속성 때문에 점차 사용하지 않고 있다. 그 대안으로 나온 방법이 2차 전지의 모델을 수정하여 그 모델을 이용하여 잔량을 추정하는 방법이다. 모델을 사용하여 2차 전지의 잔량 추정에 관한 연구는 접근하는 학문분야에

따라 크게 두 가지의 접근 방법으로 나눌 수 있다. 첫 번째 접근 방법은 2차 전지의 본질이 화학적 반응을 이용한 시스템이므로 화학적으로 접근하는 방법이다. 이 방법에서는 2차 전지의 모델을 화학반응식으로 나타내고 전해액의 농도와 온도를 이용하여 2차 전지의 잔량을 측정하는 방법이다. 이러한 방법은 정확한 잔량을 측정할 수 있다는 장점이 있는 반면 2차 전지의 전해액 농도와 온도를 측정하기 위하여 2차 전지를 훼손해야 하는 단점이 있다. 두 번째 접근 방법은 2차 전지를 훼손하지 않고 2차 전지의 외부에서 측정할 수 있는 물리량만을 이용하여 잔량을 추정하는 공학적 접근 방법이다. 이러한 방법은 2차 전지를 제품화 된 이후에 훼손하지 않아도 된다는 장점이 있어 현재 많이 연구되고 있는 방법이다[5-9].

본 논문에서는 확장칼만필터를 이용하여 2차 전지의 외부에서 측정할 수 있는 물리량인 단자전압과 전류만을 이용하여 2차 전지의 잔량을 추정한다. 사용된 2차 전지는 콩코드 배터리를 사용하였고 전자 부하기와 실시간으로 데이터를 측정하는 소프트웨어를 사용하여 실험시스템을 구축하여 연구를 수행하였다.

II장에서는 기존의 2차 전지 모델에 대하여 알아보고 본 논문에서 사용할 모델을 수립하고, III장에서는 추정된 2차 전지 잔량의 정확도를 검증하기 위하여 참값으로 사용할 잔량 테이블을 작성하고 IV장에서는 수립된 모델을 이용한 2차 전지 잔량 추정의 결과와 검증에 대하여 기술하고 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

II. 계수 추정을 위한 2차 전지 모델

본 장에서는 확장칼만필터를 적용하기 위한 2차 전지의 모델을 수립한다[10]. 먼저 확장칼만필터에 대하여 간단히 설명하고 확장칼만필터를 적용하기 위한 2차 전지의 프로세스 모델과 추정모델을 기술한다.

1. 확장칼만필터

확장칼만필터는 선형시스템에 대하여 개발된 칼만필터를

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2008. 5. 15., 채택확정 : 2008. 6. 30.

전창완, 이유미 : 순천향대학교 전기통신공학과

(jeoncw@sch.ac.kr/dkdltepf48@hanmail.net)

비선형시스템에 적용하기 위하여 말 그대로 칼만필터를 확장한 필터이다. 프로세스 방정식과 측정방정식이 다음과 같이 주어진다고 가정하자.

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k \quad (1)$$

$$z_k = h(x_k, u_k) + v_k \quad (2)$$

여기서 w_k 와 v_k 는 각각 $w_k \sim N(0, Q_k)$ 와 $v_k \sim N(0, R_k)$ 인 서로 독립인 가우시안 잡음이다. 그러면 확장칼만필터는 다음과 같다.

- State Estimate Propagation

$$\hat{x}_k(-) = f(\hat{x}_{k-1}(+), u_{k-1}) \quad (3)$$

- Error Covariance Propagation

$$P_k(-) = F_{k-1} P_{k-1}(+) F_{k-1}^T + Q_k \quad (4)$$

- Kalman Gain Matrix

$$K_k = P_k(-) H_k^T [H_k P_k(-) H_k^T + R_k]^{-1} \quad (5)$$

- State Estimate Update

$$\hat{x}_k(+) = \hat{x}_k(-) + K_k [z_k - h(\hat{x}_k(-), u_k)] \quad (6)$$

- Error Covariance Update

$$P_k(+) = (I - K_k H_k) P_k(-) \quad (7)$$

여기서

$$F_k = \left. \frac{\partial f(x_k, u_k)}{\partial x_k} \right|_{x_k = \hat{x}_k}$$

$$H_k = \left. \frac{\partial h(x_k, u_k)}{\partial x_k} \right|_{x_k = \hat{x}_k}$$

2. 프로세스 방정식

2차전지의 프로세스 방정식은 많이 사용하는 다음의 모델을 사용한다.

$$SOC_{k+1} = SOC_k - \frac{n(i_k) i_k \Delta t}{C} \quad (8)$$

여기서 SOC_k 는 시간 k 에서의 2차 전지의 잔량(SOC, State of Charge), $n(i_k)$ 은 셀 전하량 효율(본 논문에서 방전시는 1, 충전시는 0.995를 사용), i_k 는 시간 k 에서의 입력 전류, C 는 셀 표준용량, Δt 는 샘플링 시간을 각각 나타낸다.

3. 측정방정식

프로세스 방정식은 (8)을 많이 사용하는데 측정방정식은 다음과 같은 여러 가지 모델들이 연구되어져 왔다[11,12].

- Shepherd 모델: $y_k = 4.2 - Ri_k - K_1 / SOC_k$
- Unnewehr Universal 모델: $y_k = 4.2 - Ri_k - K_1 SOC_k$
- Nernst 모델: $y_k = 4.2 - Ri_k - K_1 \ln(SOC_k)$
- Modified Nernst 모델:

$$y_k = 4.2 - Ri_k - K_2 \ln(SOC_k) + K_3 \ln(1 - SOC_k)$$

여기서 y_k 는 셀 단자 전압, R 은 내부저항, K_1 는 극저항이고

K_1, K_2, K_3 는 데이터를 잘 혼합하기 위해 선택된 상수이다.

위의 모델들을 살펴 보면 Shepherd 모델부터 점점 단점을 보완해서 정확한 모델을 수립해 나가는 과정을 볼 수 있는데 본 논문에서는 위의 모델들을 결합한 다음의 모델을 사용한다.

$$y_k = K_0 - Ri_k - K_1 / SOC_k - K_2 SOC_k + K_3 \ln(SOC_k) + K_4 \ln(1 - SOC_k) \quad (9)$$

여기서 R 은 셀의 내부저항, K_0, K_1, K_2, K_3, K_4 는 데이터를 잘 혼합하기 위해 선택된 미지상수로서 다음에 설명하는 바와 같이 최소자승법에 의해 구할 수 있다. 내부저항과 미지상수들을 구하기 위해 다음과 같이 벡터를 정의한다.

$$Y = [y_1, y_2, \dots, y_N], \quad H = [h_1^T, h_2^T, \dots, h_N^T]^T \quad (10)$$

여기서 i_k^+ 는 충전시의 전류이고, i_k^- 는 방전시의 전류라고 할 때 $h_j = [1, i_j^+, i_j^-, 1/SOC_j, SOC_j, \ln(SOC_j), \ln(1 - SOC_j)]^T$ 이다.

미지 상수들로 이루어진 벡터 θ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\theta = [K_0, R^+, R^-, K_1, K_2, K_3, K_4]^T \quad (11)$$

그러면 (3)과 (4)에서

$$Y = H\theta$$

이고 미지상수는 최소자승법에 의하여 다음과 같이 구해진다.

$$\theta = (H^T H)^{-1} H^T Y \quad (12)$$

III. SOC 테이블 구축

본 논문에서는 실제 2차 전지의 SOC를 추정하므로 추정된 결과를 검증하는 것이 필요하다. 추정된 SOC를 검증하기 위하여는 정확한 SOC 값을 알아야만 한다. 그러나 2차 전지 제조사의 모든 데이터를 구할 수 없는 상황 하에서 SOC의 참값을 구하는 것은 쉽지 않다. 따라서 본 논문에서는 실험 대상인 2차 전지를 여러 가지 상황 하에서 반복적인 충방전 실험을 통하여 실제에 가까운 SOC 값을 구해 테이블로 작성하여 추정된 값과 비교할 수 있도록 하였다. 여러 가지 상황 하에서 충방전 실험을 하였으나 실험 결과에 대한 경향이 비슷하므로 이 곳에서는 대표적인 결과 몇 가지만 기술한다.

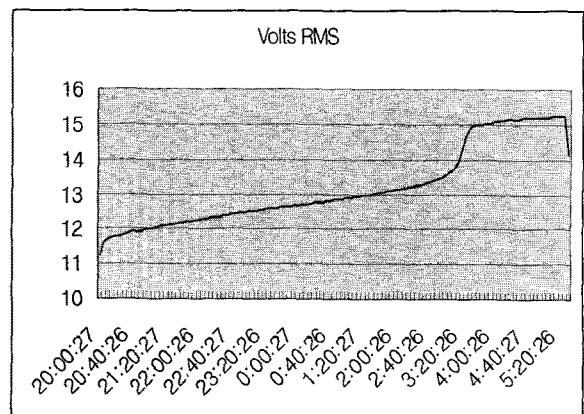


그림 1. 10A로 충전한 경우 시간에 따른 전압 변화.
Fig. 1. Time vs. voltage graph(charging with 10A).

그림 1은 10A로 충전한 경우의 시간에 따른 전압 그래프이다. 가로축은 시간을 나타낸 것으로 20시 00분 27초에 충전을 시작하여 그 다음날 오전 5시 20분 정도까지 이어진 것을 나타내며 세로축은 그 때의 전압을 rms(root mean square)값으로 나타낸 것이다. 위의 그래프에서 보면 뒷부분에서 15V 이상으로 전압이 충전이 되는데 충전이 끝난 후, 1시간이 지난 다음 OCV(Open Circuit Voltage)를 측정하면 12.85V가 정상적으로 나온다.

그림 2는 이 때 입력 전류를 측정한 것으로 거의 충전이 다 되어가면 전류가 빠른 속도로 줄어드는 것을 볼 수 있다. 충전시 전류가 10A보다 약간 적은 값이 나오는 것은 계측기 및 부하의 오차에서 기인한 것으로 사료된다.

그림 3은 이 때 적산전류를 나타낸 것으로 최종적으로 86.7AH였으며 측정된 적산전류의 효율은 약 80%정도됨을 알 수 있다.

그림 4는 15분 주기로 10A로 방전한 경우의 전압 변화를 나타낸 것으로써 자율이동시스템이 일정하게 전류를 소비하지 않는 실제적인 상황을 고려한 것이다. 11V 근처에서 급격하게 전압이 떨어지는 것을 볼 수 있다.

그림 5는 이 때 전류의 변화를 나타낸 것으로 과방전에 의한 2차 전지의 손상을 막기 위해 전압이 10.5V 부근에 도달하였을 때 저전류를 보내주어 10.5V 이하로 떨어지지 않게 하였다.

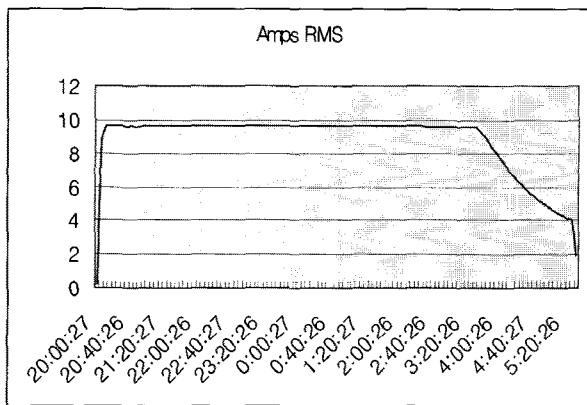


그림 2. 10A로 충전한 경우 시간에 따른 전류 변화.
Fig. 2. Time vs. input current graph(charging with 10A).

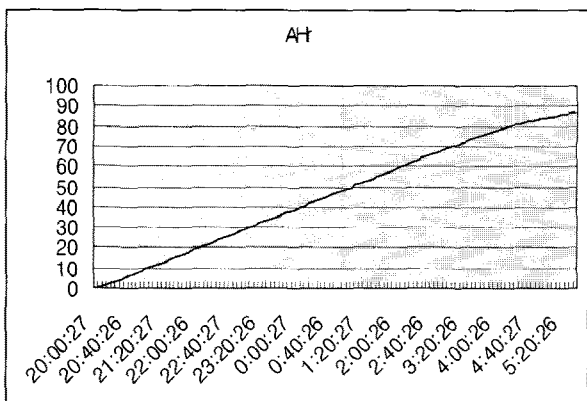


그림 3. 10A로 충전한 경우 시간에 따른 적산 전류 변화.
Fig. 3. Time vs. accumulated current graph(charging with 10A).

그림 6은 이 경우의 적산전류 그래프이다. 15분 주기 방전을 하였기 때문에 계단식의 그래프가 나타났다. 적산전류의 효율은 약 80%로 나왔다. 그래프가 80Ah 부근에서 완만해진 것으로 보아 이 때 10.5V에 도달한 상태임을 알 수 있다.

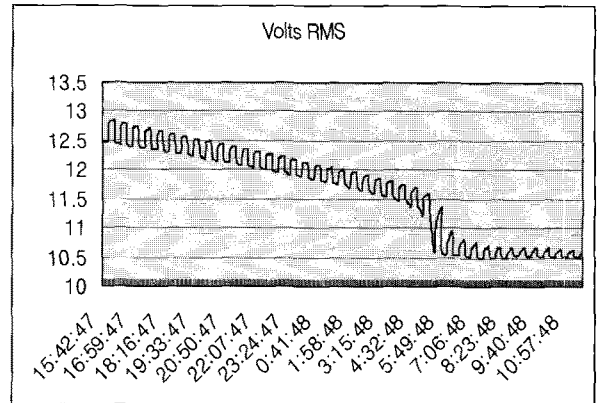


그림 4. 15분 주기로 10A로 방전한 경우 시간에 따른 전압 변화.
Fig. 4. Time vs. voltage graph(discharging with 10A, 15min. cycle).

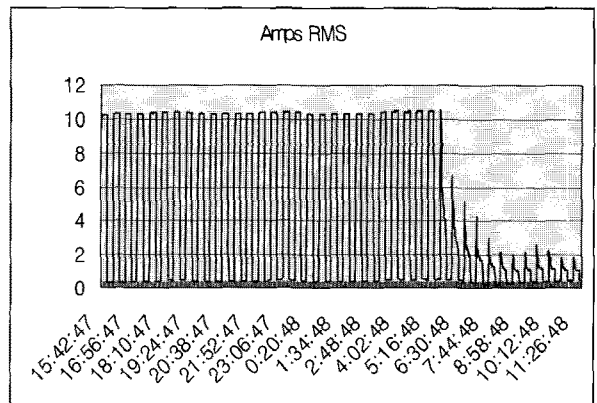


그림 5. 15분 주기로 10A로 방전한 경우 시간에 따른 전류 변화.
Fig. 5. Time vs. input current graph(discharging with 10A, 15min. cycle).

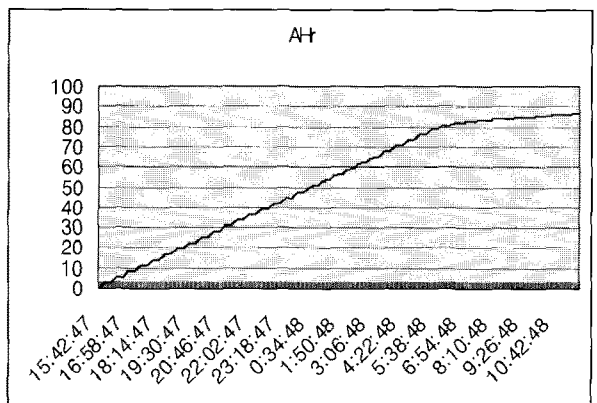


그림 6. 15분 주기로 10A로 방전한 경우 시간에 따른 적산 전류 변화.
Fig. 6. Time vs. accumulated current graph(charging with 10A, 15min. cycle).

표 1. SOC 테이블.

Table 1. SOC table.

SOC(%)	무부하 상태의 단자전압	SOC(%)	10A로 방전할 경우의 단자전압
100%	12.85	100%	12.51
90%	12.73	90%	12.37
80%	12.61	80%	12.25
70%	12.49	70%	12.12
60%	12.37	60%	12.00
50%	12.25	50%	11.88
40%	12.13	40%	11.77
30%	12.11	30%	11.62
20%	11.99	20%	11.47
10%	11.77	10%	11.25
0%	11.65	0%	10.42

이상과 같은 실험을 다양한 조건 하에서 실험을 수행하여 다음과 여러 가지 조건에 따른 SOC 테이블을 구축하였다.

표 1은 설명을 위해 구축된 SOC 테이블의 일부를 샘플로 나타낸 것이다.

IV. SOC 추정 결과 및 분석

II장에서 설명한 2차 전지의 모델에 확장칼만필터를 적용하여 2차 전지의 잔량을 추정하여 III장에서 구축한 SOC 테이블의 값과 비교하였다. 이 때 프로세스잡음의 공분산은 0.01, 측정잡음의 공분산은 0.5, 초기 상태값의 오차공분산은 0.05로 하였다.

그림 7은 10A로 10분 주기로 방전을 한 경우의 확장칼만 필터가 추정한 2차 전지의 잔량과 그 때의 단자전압을 나타내고 있다.

그림 7에서 위의 그림이 추정한 2차 전지의 잔량(SOC)값과 참값인 SOC 테이블의 값과 비교한 것이고 아래 그림이 그 때의 단자 전압을 비교한 것이다. 적색으로 표시된 것이 SOC의 참값(true SOC)이고 연두색으로 표시된 것이 추정된 값(estimated SOC)이다. 그림에서 볼 수 있듯이 초기값을 다르게 주어도 얼마의 시간이 지나면 2차 전지의 잔량을 제대로 추정하는 것을 볼 수 있다. 아래 그림에서 연두색은 단자전압의 참값(measured voltage)을 나타내고 파란색은 추정된 단자전압(estimated voltage)이다. 그림에서 단자전압 역시 참값과 일치된 값을 추정하고 있음을 알 수 있다.

그림 8은 20A로 10분 방전 후 15분 휴지를 반복한 경우 시간에 따른 단자전압과 SOC의 변화를 나타낸 그래프로 위의 그림이 SOC를 나타내고 밑의 그림이 그 때의 단자전압을 나타낸 것이다. 위의 그림에서 적색으로 표시된 것이 SOC의 참값(true SOC)이고 연두색으로 표시된 것이 추정된 값(estimated SOC)이다. 그림에서 볼 수 있듯이 초기값을 다르게 주어도 얼마의 시간이 지나면 2차 전지의 잔량을 제대로 추정하는 것을 볼 수 있다. 아래 그림에서 연두색은 단자전압의 참값(measured voltage)을 나타내고 파란색은 추정된 단자전압(estimated voltage)이다. 그림에서 단자전압 역시 참값과 일치된 값을 추정하고 있음을 알 수 있다. 10A로 방전할

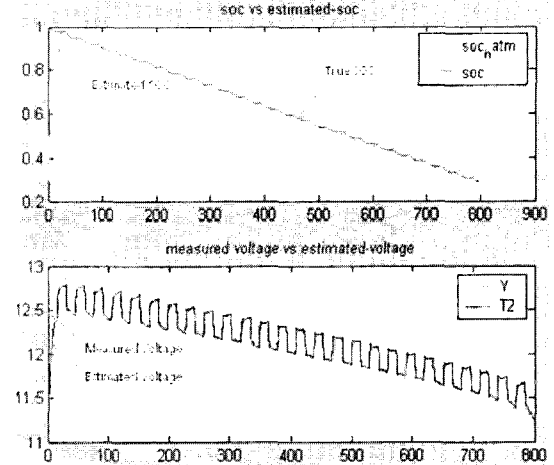


그림 7. 10분 주기로 10A로 방전한 경우 시간에 따른 단자전압과 SOC.

Fig. 7. Voltage and SOC graph (discharging with 10A, 10min. cycle).

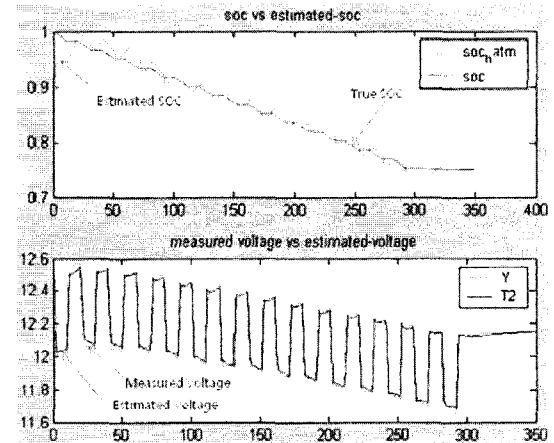


그림 8. 20A로 10분 방전 후 15분 휴지를 반복한 경우 시간에 따른 단자전압과 SOC.

Fig. 8. Voltage and SOC graph (10min. discharging and 15 min. pause with 20A).

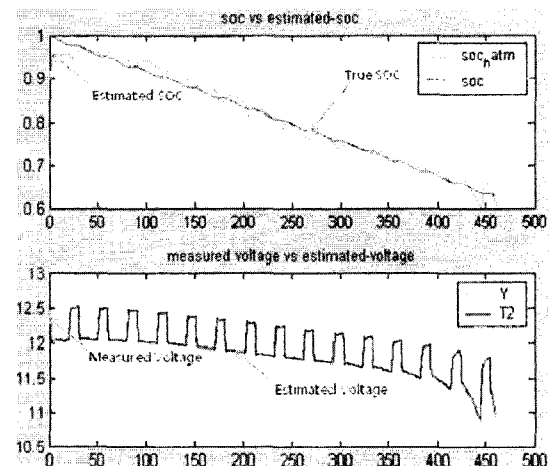


그림 9. 25A로 10분 방전 후 15분 휴지를 반복한 경우 시간에 따른 단자전압과 SOC.

Fig. 9. Voltage and SOC graph (10min. discharging and 15 min. pause with 25A).

경우와 비교해 보면 거의 비슷한 추정 결과를 보여주는 단자 전압과는 달리 SOC의 경우는 추정 성능이 약간 떨어지는 것을 볼 수 있는데 이는 대용량의 전류로 방전할 경우 2차 전지의 화학반응이 급격하게 일어나기 때문에 시스템의 불확정성이 높아지기 때문인 것을 분석된다.

조금 더 열악한 환경에 대한 추정 성능을 알아보기 위하여 이번에는 25A로 10분 방전 후 15분 휴지를 반복하는 실험을 하였다. 실제 초당 25A의 전류를 소모하는 시스템은 많지 않지만 본 논문에서 제안한 SOC추정 기법의 성능을 시험해 보기 위하여 이러한 시험을 수행하였다. 그림 9는 이 때의 결과를 나타내는 그래프로 역시 위의 그림이 SOC를 나타내고 밑의 그림이 그 때의 단자전압을 나타낸 것이다. 위의 그림에서 적색으로 표시된 것이 SOC의 참값(True SOC)이고 연두색으로 표시된 것이 추정된 값(Estimated SOC)이다. 아래 그림에서 연두색은 단자전압의 참값(Measured Voltage)을 나타내고 파란색은 추정된 단자전압(Estimated Voltage)이다. 그림에서 볼 수 있듯이 방전 초당 소모하는 전류가 커지자 거의 비슷한 추정 결과를 보여주는 단자전압과는 달리 SOC의 경우는 추정 성능이 약간 더 떨어지는 것을 볼 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 확장칼만필터에 기초한 2차 전지의 SOC 추정 기법을 다루었다. 추정된 SOC의 정확도를 비교하기 위하여 많은 실험에 의한 SOC 테이블을 구축하여 추정된 SOC와 비교하였다. 실제 상황과 유사한 상황을 만들기 위하여 여러 가지 부하로 충방전을 반복하는 실험을 통하여 얻어진 데이터로 확장칼만필터에 적용하여 SOC가 매우 잘 추정됨을 보였다. 본 논문의 결과는 요즘 비약적으로 발전하고 있는 자율이동체의 연구에 큰 기여를 할 것으로 기대되어진다.

참고문헌

[1] Y. Hada and S. Yuta, "Robust navigation and battery re-charging system for long term activity of autonomous mobile robot," *Proceedings of the International Conference on Advanced*

Robotics, vol. 9, 1999.

[2] C. Barbier and H. Meyer, "A battery state of charge indicator for electric vehicles," *Proc. of the Inst. of Mech.* pp. 29-34, Eng., 1994.

[3] M. Jayne and C. Morgan, "Novel voltage models of lead acid battery systems for electric vehicles," *Polytechnic of Wales, U.K.*, October 1987.

[4] C. Barbier and H. Meyer, "A battery state of charge indicator for electric vehicles," *Proc. of the Inst. of Mech.* pp. 29-34, Eng., 1994.

[5] K. Floyd, Z. Noworolski, J. Noworolski, and W. Sokolski, "Assessment of lead-acid battery state of charge by monitoring float charging current," *Proc. of 16th Int. Tele. Energy Conf.*, pp. 602-608, 1994.

[6] F. Huet, "A review of impedance measurements for determination of the state of charge or state of health of secondary batteries," *Power Sources 70*, pp. 59-69, 1998.

[7] W. Ogata, M. Takano, S. Kouno, and K. Yoshida, "Deterioration estimation method using pulse discharge and charge characteristics of lead-acid batteries," *Trans IEICE B-I, J76-B-I*, 10, PP. 719-726, 1993.

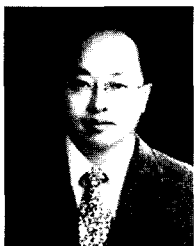
[8] M. Verbrugge, E. Tate, S. Sarbacker, B. Koch, Quasi-Adaptive State of Charge Algorithm of Nickel-Metal Hydride Batteries, *United States Patent 6359419*, 19 March 2002.

[9] S. Y. Lee, W. Y. Wang, and T. Y. Kuo, "Soft computing for Battery State-of-Charge(BSOC) estimation in battery string systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 1, 2008.

[10] Gelb, "Applied Optimal Estimation", MIT Press, Cambridge, MA 1974.

[11] G. Plett, "Kalman filter SOC estimation for LiPB HEV cells," *Proceedings of the 19th International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition (EVS19)*, 19-23 October 2002, Busan, Korea.

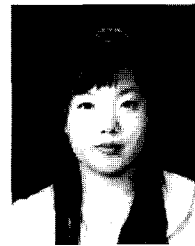
[12] G. L. Plett "LiPB dynamic cell models for Kalman-filter SOC estimation," *Proceedings of the 19th International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition (EVS19)*, 19-23 October, 2002.



전 창 완

1986년 서울대학교 제어계측공학과(공학사). 1988년 서울대학교 제어계측공학과(공학석사). 1996년 서울대학교 제어계측공학과(공학박사). 삼성전자 근무. 현재 순천향대학교 전기통신공학과 교수. 관심분야는 System Identification, GPS

응용, BMS.



이 유 미

2003년 순천향대학교 정보기술공학부(공학사). 현재 순천향대학교 전기통신공학과 석사과정. 관심분야는 응용소프트웨어, GPS 응용시스템.