

확률분포에 기반을 둔 리튬이온 배터리 셀 열화 모델

허건의^{1,2}, 김종훈²

한국항공우주연구원¹, 충남대학교 전기공학과²

Distribution-based lithium-ion battery cell degradation model

Kon Yi Heo^{1,2}, Jonghoon Kim²

Korea Aerospace Research Institute¹, Electrical Engineering, Chungnam National University²

ABSTRACT

본 논문에서는 리튬이온 배터리 셀의 수명을 예측하기 위하여 확률 분포에 기반을 둔 열화 모델을 사용한다. 수명을 예측하기 위하여 충·방전 사이클에 따른 리튬이온 배터리 셀의 열화된 용량을 가우시안 분포와 최대우도추정법을 사용하고, 가우시안 분포에 사용된 평균과 표준편차를 구하여 이를 바탕으로 수명을 예측한다.

1. 서 론

리튬이온 배터리는 에너지 밀도가 높아짐에 따라 전기차 또는 에너지저장장치 등 다양한 대형 시스템에서 사용되고 있다. 시스템의 신뢰성 평가 또는 정비 계획에 있어서, 구성품인 배터리를 시기적절하게 교체해주는 것은 높은 신뢰도를 유지하기 위한 필수적인 작업이다. 따라서 배터리의 상태나 수명을 추정하는 것은 시스템 운용 측면에서 시스템 안전성을 유지하는데 중요할 뿐만 아니라 배터리 자원 관리나 비용 효율성 측면에도 도움이 된다.

리튬이온 배터리의 열화 현상은 일반적으로 용량이나 출력의 감소 현상으로 나타나고, 그 열화 모드는 배터리 셀 내의 리튬, 양극재, 음극재의 소실 때문인 것으로 알려져 있다.^[1] 하지만 재료의 열화에 대하여 실시간 확인이 어렵기 때문에 물리적인 확인보다 시간 흐름에 따른 용량 등의 측정된 데이터를 바탕으로 변동량에 따라 열화 상태를 유추할 수 있다. 통계적 모델은 확률 분포를 바탕으로 측정된 데이터를 근사화하는 방법으로 시간과 성능과의 관계에 대하여 신뢰도 평가나 수명 예측 등을 할 수 있다.^[2] 따라서 본 논문에서는 리튬이온 배터리 셀을 가우시안 분포를 기초로 하여 수명 예측을 위한 열화 모델을 제시한다.

2. 가우시안 분포 열화 모델

2.1 시험 구성 및 수행

본 논문에서 사용된 리튬이온 배터리 셀은 INR 18650-25R이며, 충방전 전류 조건은 1C-rate(2.5A), 충전 조건은 4.2V, 100mA(cut-off), 방전 조건은 2.5V이며, 온도 25°C에서 수행되었다.

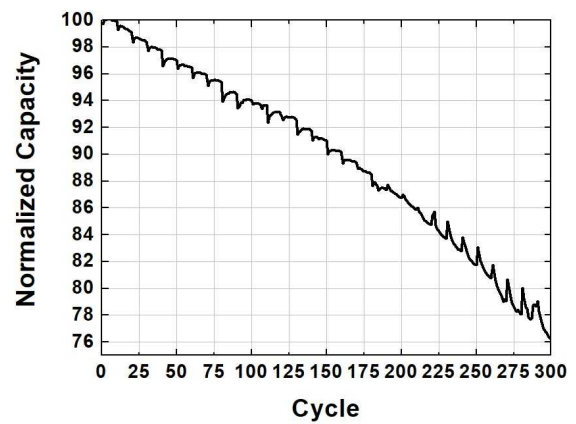


그림 1 배터리 충방전에 따른 용량 변화
Fig. 1 Capacity change according to battery charge-discharge cycles

그림 1은 리튬이온 배터리 셀의 충방전이 진행됨에 따라 용량이 감소되는 것을 보여준다. 충방전이 진행될수록 노화되며, 일반적으로 정격 용량보다 80% 이하가 되면 고장 또는 수명 종료 시점으로 판단하고 260사이클에서 정격 용량의 약 80%를 나타내었다.

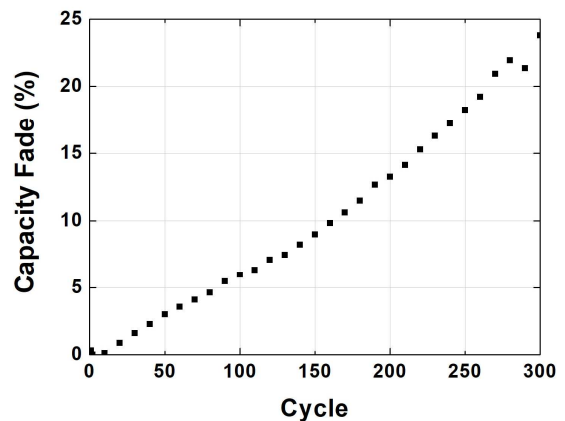


그림 2 충방전 사이클에 따른 용량 저하율
Fig. 2 Capacity fade rate according to charge-discharge cycles

그림 2는 충방전 사이클에 따라 용량 저하율을 나타내며,

0 ~ 300사이클까지 10사이클 간격으로 데이터를 나타내었고, 이 데이터를 열화 모델에 사용한다.

2.2 열화 모델 유도

리튬이온 배터리 셀의 용량 저하율을 바탕으로 평균 μ 와 분산 σ^2 인 가우시안 분포를 식 (1)과 같이 열화 모델에 기본 식으로 사용한다.

$$f(x | \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(x-\mu)^2}{\sigma^2}\right) \quad (1)$$

평균과 표준편차는 식 (2)와 (3)에서와 같이 사이클 수가 증가함에 따라 증가될 것으로 가정한다. A와 B는 상수이다.

$$\mu = \mu(\text{cycle}) = A \times \text{cycle} \quad (2)$$

$$\sigma = \sigma(\text{cycle}) = B \times \text{cycle} \quad (3)$$

모든 $i = 1, \dots, n$ 에 대하여 독립적으로 $X_i \sim N(\mu, \sigma^2)$ 이라 하면 식 (4)를 최대우도추정법을 사용하여, 이 값을 최대로 가지는 A와 B를 구한다.

$$f(x | \mu, \sigma^2) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(x_i-\mu)^2}{\sigma^2}\right) \quad (4)$$

그림 3과 같이 사이클이 증가될수록 A(검은색 사각형)는 일정해지나, B(빨간색 원)는 감소하는 경향을 나타낸다.

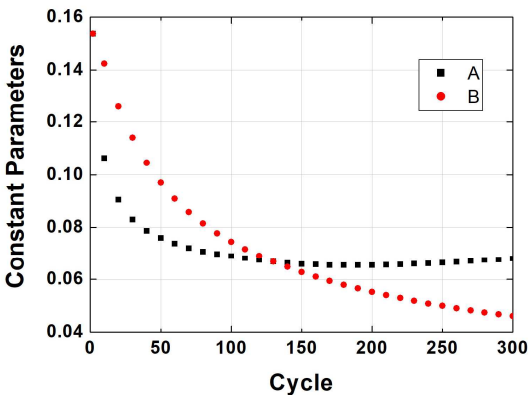


그림 3 해당 사이클까지의 용량 감소에 따른 A와 B
Fig. 3 A and B according to the capacity fade up to the given cycles

2.3 열화 모델 결과

그림 4에서는 고장 시점인 260사이클의 70% 수준인 210사이클까지 측정된 데이터(검정색 사각형)를 바탕으로, 최대우도 추정법을 사용하여 평균(회색 삼각형)과 95% 신뢰구간(회색 점선) 사이의 수명을 예측하는 것을 보여준다. 열화 모델 결과는 240사이클의 95% 신뢰구간 상한치에서 19.90% 용량 감소로 고장이 시작될 것으로 판단하였으며, 평균적으로 300사이클에서의 고장을 예측하였다. 측정된 데이터는 모두 신뢰구간 이내에 들어오는 것으로 확인된다.

측정된 데이터와 예측된 데이터에서는 최소 20사이클이라는 차이를 보인다. 독립2표본 t-검정을 수행한 결과, 유의수준 5% 기준으로 볼 때, 210사이클까지의 p-value는 0.5998로 두 결과값의 평균은 유의미하게 차이가 나지 않으나, 220사이클 ~ 300사이클의 p-value는 0.05866으로 차이가 난다. 이는 식 (2)

가 선형(A=0.065542)이기 때문에 감소율이 비선형적으로 급격하게 변화가 된다면 예측의 정확도가 떨어진다는 것을 보여준다. 이는 그림 3에서도 보여주듯이 A는 약 100사이클 이후에 큰 변동 없이 일정하게 유지되기 때문이다. 실제로 측정된 데이터를 300사이클까지의 선형 회귀분석을 수행하면 결정계수(R-squared) 0.9833인 반면, 비선형 회귀분석(3차식)의 경우에는 결정계수 0.9979로, 비선형에 가깝다. 따라서 평균 등을 비선형으로 조정하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

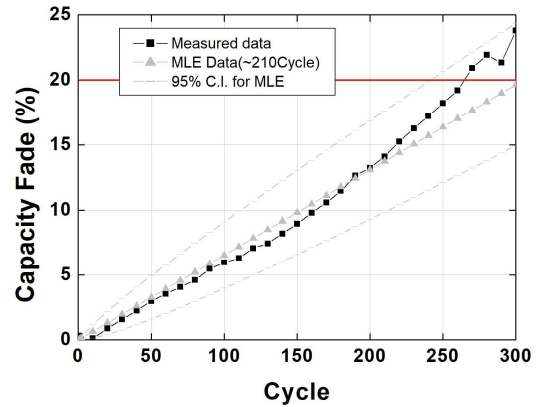


그림 4 가우시안 분포를 기반으로 한 열화 모델 분석 결과
Fig. 4 An analysis result of a degradation model based on Gaussian distribution

3. 결론

본 논문에서는 리튬이온 배터리 셀의 수명을 예측하기 위하여 가우시안 분포에 기반을 둔 열화 모델을 사용하였다. 가우시안 분포에 사용될 평균과 표준편차는 1차식으로 가정하였다. 측정된 데이터의 고장 시점(260사이클)이 70% 수준인 210사이클까지 측정된 데이터를 바탕으로 최대우도추정법을 사용한 결과, 240사이클의 95% 신뢰구간 상한치에서 고장이 시작될 것으로 예측되었다. 측정 값과 예측 값 사이에서 차이가 발생하였으나 이는 측정된 데이터가 비선형적인 면을 갖고 있기 때문이다. 따라서 향후 연구에서는 평균과 분산에 대한 비선형 식과 다양한 분포들을 활용하여 열화 모델을 통해 수명을 예측하는 것이 필요하다.

참고 문헌

- [1] Christoph R. Birkl, Matthew R. Roberts, et al., "Degradation Diagnostics For Lithium Ion Cells", J. Power Sources, Vol. 341, pp. 373-386, 2017, February.
- [2] W. Meeker, Y. Hong, et al. "Degradation models and analyses" in Encyclopedia of Statistical Sciences, New York, NY, USA:Wiley, 2011.