

## ARIMA를 이용한 배터리 수명 예측 성능 분석

김도원, 신경섭

상명대학교

wlsgr479@gmail.com, ksshin@smu.ac.kr

## Performance Analysis of Battery Lifetime Prediction using ARIMA

Kim Do Won, Shin Kyung Seop

Sangmyung Univ.

## 요약

현대 사회에 휴대용 기기부터 전기자동차, 전력 저장장치까지 전력이 필요한 전반의 분야에서 사용되는 2차전지에 많은 관심이 몰린 가운데 재충전이 가능한 2차 전지로 각광받고 있는 리튬 이온 배터리에 대하여 battery management system으로부터 추정된 충방전 cycle 별 capacity를 이용한 수명 예측의 필요성이 대두되고 있다. 본 논문에서는 배터리 데이터 수명 예측을 하는데 시계열 데이터의 분석 모델인 AutoRegressive Intergrated Moving Average를 이용하여 capacity 저하에 영향을 미치는 cycle 수의 threshold를 구하는 것이 목적이다. 이를 통해 배터리 공정 과정에서의 검증이나 사용자가 배터리를 사용하면서 발생할 수 있는 배터리 용량 저하 cycle에 미치는 영향을 연구하고자 하였고, 실험을 통해 시간이 지남에 따라 높은 정확성으로 예측할 수 있는 threshold를 구할 수 있다.

## I. 서론

리튬 이온 배터리는 재충전이 가능한 2차 전지로, 타 전지에 비해 높은 에너지 밀도와 높은 전압의 특징을 가지고 작은 장난감에서부터 휴대용 전자기기, 자동차 및 드론 등과 같은 다양한 제품에서 사용되고 심지어 전력 저장장치나 우주왕복선에서도 사용되고 있다. 그러나 시스템의 최적 성능을 보장하기 위해서는 배터리의 용도별 수명성능을 고려한 충방전 설계가 필수적이며, 배터리 검증에 소요되는 시간이 상당부분을 차지하고 있다. 따라서, 본 논문에서는 리튬이온 배터리에 대하여 Battery Management System(BMS)로부터 추정된 충방전 cycle에 다른 capacity를 이용하여 배터리를 사용함에 따라 발생하는 배터리 capacity 저하 정도를 예측하는데 필요한 cycle을 분석하여 배터리 검증에 필요한 시간을 단축하는 데에 도움이 될 수 있도록 한다.

과거 수치정보를 사용할 수 있고 과거 패턴을 이용하여 미래에도 계속 될 것이라는 가정이 합리적이라고 생각할 때 정량적인 예측문제로 볼 수 있으며, 이 문제를 해결하기 위하여 시계열 데이터를 이용한 분석을 진행하는 것이 효율적이다. 본 논문에서는 배터리 capacity 저하 정도를 예측하는데 시간에 따라 순차적으로 관측된 것을 시계열 데이터로 보고, cycle에 따른 capacity의 저하 정도로 시계열 데이터화하여 활용할 수 있음을 이용한다. [1]

시계열 데이터를 분석하는데 정상성은 중요한 요소중 하나이다. 본 논문에서 이용하고자 하는 데이터는 non-stationary하기 때문에 differencing작업을 거쳐 stationary하게 만든 후 autoregressive(AR) 모델과 Moving average(MA) 모델을 함께 사용하여 만들어진 AutoRegressive and Moving Average (ARMA) 모델을 변형한 AutoRegressive Intergrated Moving Average (ARIMA) 모델을 사용한다.

본 논문에서 사용된 Dataset [2]은 Michigan Battery Laboratory 대학에서 제작한 별도의 Stress Factor 적용이 없는 10개의 프리즘형 리튬 이온 파우치 전지로 셀 공칭 용량은 2.36Ah이며 NCM111의 음극과 흑연을 양극으로 구성되어 있다. 실온상태(23℃~25℃)에서 충방전 과정을 거친 cycle수와 discharge capacity 데이터를 사용하였고 이를 이용하여 본 논

문에서는 각 cycle수 별로 달라지는 discharge capacity의 데이터를 비교 분석한다.

## II. 본론

본 논문에서는 배터리의 수명 예측을 위해 ARIMA 모델을 기반으로 하여 battery의 cycle당 capacity 저하 추정을 수행한다. ARIMA 모델은 AR 모델과 MA 모델을 함께 사용하여 단기적인 예측 뿐만 아니라 과거의 데이터가 지니고 있던 추세까지 반영하여 장기적인 예측을 가능하게 하는 모델이다. [3]

AR 모델은 자기 자신을 dependent variable  $y_t$ 로 하고, 이전 시점의 시계열을 independent variable로 갖는 모델로 예측하는 문제에 있어서 time  $t$ 에 일어난 일을 예측하는데  $t-1$ 에서의 데이터가 제일 좋은 predictor라는 아이디어에서 시작된 것이다.

다음과 같은 기본적인 모델을 AR(p)라고 칭하며,  $\Phi_t$ 는 -1부터 1사이의 값을 갖는 계수,  $\epsilon_t$ 는  $t$  시점에서의 white noise이다.

$$y_t = c + \Phi_1 y_{t-1} + \Phi_2 y_{t-2} + \dots + \Phi_p y_{t-p} + \epsilon_t \quad (1)$$

MA 모델은 자기 자신을 dependent variable로 하고, 해당 시점과 그 과거의 white noise들을 independent variable로 갖는 모델로 regression에서 AR은 과거 값을 이용하는 대신에 MA는 과거의 error를 통해 예측하는데 활용한다.

다음과 같은 기본적인 MA 모델을 MA(q)라고 칭하며,  $\theta_t$ 는 -1부터 1사이의 계수,  $\epsilon_t$ 는 white noise이다.

$$y_t = c + \epsilon_t + \theta_1 \epsilon_{t-1} + \theta_2 \epsilon_{t-2} + \dots + \theta_q \epsilon_{t-q} \quad (2)$$

두가지 모델을 합한 것을 ARMA라 하며, 데이터가 stationary을 나타내는 시계열 데이터 예측에 이용가능하다. 반면에 예측에 사용되는 수많은 데이터는 non-stationary한 경우가 많기 때문에, differencing을 이용하여 stationary한 데이터로 바꿔주는 것이 필요하다. 위의 세 과정을 거친 모델이 ARIMA 모델로 시계열 분석 및 예측에 널리 사용되어왔고, 특히 non-stationary한 데이터들을 differencing을 통해 예측이 가능한 장점이 있다.

다음과 같은 모델을 ARIMA(p,d,q) 라 하며,  $y'$ 은 differencing을 거친 시계열 데이터이다.

$$y'_t = c + \Phi_1 y'_{t-1} + \dots + \Phi_p y'_{t-p} + \theta_1 \epsilon_{t-1} + \dots + \theta_q \epsilon_{t-q} + (\partial)$$

각 AR 모델과 MA 모델에서의 계수  $\Phi_t$ 와  $\theta_t$ 는 다음과 같은 제한조건이 있는데, AR 모델은 보통 stationary를 나타내는 데이터에만 사용하기 때문이다.

$$\text{AR}(1) : -1 < \Phi_1 < 1$$

$$\text{AR}(2) : -1 < \Phi_2 < 1, \Phi_1 + \Phi_2 < 1, \Phi_2 - \Phi_1 < 1(4)$$

stationary를 나타내는 데이터라면 AR(p) 모델을 MA( $\infty$ )로 쓸 수 있고, 이 MA 모델을 가역적(invertible)이라고 부른다. 즉, 어떤 가역적인 MA(q) 과정을 AR( $\infty$ )로도 쓸 수 있는데, 이에 따라 다음과 같은 제한조건이 생긴다.

$$\text{MA}(1) : -1 < \theta_1 < 1$$

$$\text{MA}(2) : -1 < \theta_2 < 1, \theta_1 + \theta_2 > -1, \theta_1 - \theta_2 < 1(5)$$

각 p와 q가 3보다 큰 경우에는 복잡한 조건이 성립하지만, R에서 모델을 다룰 때 제한조건을 처리해준다.

배터리 수명예측에 ARIMA 모델을 R을 통하여 구현하였고, 다음은 cycle에 따른 discharge capacity의 저하정도를 예측한 것이다. 데이터는 실온상태(23℃~25℃)에서 충방전을 거친 배터리로 cycle 수를 변경하며 discharge capacity를 비교하였고, 각 1번 배터리부터 10번 배터리까지 10개의 서로 다른 데이터를 이용하여 비교분석 했다. 모델 평가는 Root Mean Squar Error(RMSE)를 비교하여 train data와 test data를 비교했다. 실험에 사용한 tool은 R의 forecast library에 있는 auto.arima 함수를 사용하여 예측했다.

그림 1은 3번 배터리의 260cycle까지의 데이터를 사용하여 train하고, 그 이후를 예측하여 본래의 이후 데이터와 비교한 graph이다.

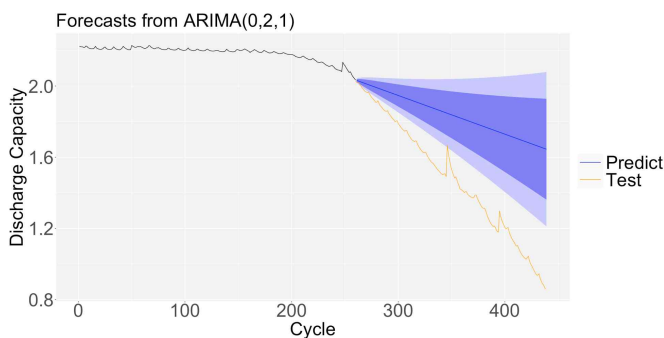


그림 1 260 cycle에서 ARIMA model을 적용한 예측결과

그림 2는 3번 배터리의 320cycle까지의 데이터를 사용하여 train하고, 그 이후를 예측하여 본래의 이후 데이터와 비교한 graph이다.

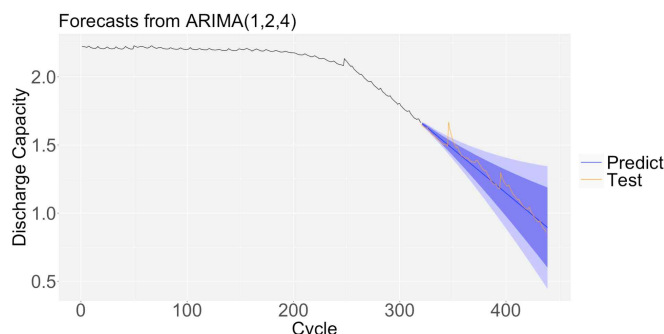


그림 2 320 cycle에서의 ARIMA model

표 1은 예측 시작점이 240~400cycle인 데이터를 10cycle 간격으로 나누어 측정된 뒤, 각 1번부터 10번 배터리의 RMSE 평균값을 나타내었다.

표 1 240~400cycle 에서 RMSE 성능

	cycle:240	cycle:250	cycle:260	cycle:270	cycle:280	cycle:290	cycle:300	cycle:310	cycle:320
RMSE	0.52533421	0.62086002	0.47826598	0.23745946	0.1782971	0.13575188	0.11472659	0.10379711	0.08893525
	cycle:330	cycle:340	cycle:350	cycle:360	cycle:370	cycle:380	cycle:390	cycle:400	
RMSE	0.09060295	0.08337975	0.40492568	0.13596848	0.09666489	0.08743874	0.10523524	0.09665072	

240 cycle 이전에서 train을 마친 후 예측한 모델은 배터리 capacity 의 저하를 학습하지 못하기 때문에 신뢰성이 부족하다. cycle 수가 진행될수록 RMSE 값이 감소하는 경향을 보이고, 320cycle부터는 RMSE값이 0.1 아래로 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 ARIMA 모델을 이용하여 배터리 수명 예측에 활용할 수 있는 것을 알 수 있다. 이후의 cycle에서 예측하는데 데이터의 이상값에 따라 RMSE 값이 큰 편차를 보여도 cycle의 진행에 따라 다시 감소하는 경향을 보이고 있기 때문에 적절하다고 판단하였다.

### III. 결론

2차전지로 각광받고 있는 리튬이온배터리의 공정과정과 배터리 검증에서 필요한 수명예측에 상당한 시간이 소요된다. 본 논문에서는 non-stationary한 시계열 데이터를 differencing하고, AR 모델과 MA 모델의 가역성을 이용한 ARIMA 모델을 통하여 데이터의 추세와 regression을 활용하였다. 320 cycle 부터는 RMSE값에 90% 이상의 신뢰성을 보장한다는 것을 알 수 있다.

### ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 SW중심대학지원 사업의 연구결과로 수행되었음(2019-0-018801). 또한 본 연구는 과학기술정보통신부의 기본연구사업의 연구결과로 수행되었음(NRF-2021R1F1A1064059).

### 참 고 문 헌

- [1] V. Kozitsin, I. Kaster, and D. Lakontsev, "Online forecasting and anomaly detection based on the ARIMA model", *applied Sciences*, 2021.
- [2] Weng et al, "Predicting the impact of formation protocols on battery lifetime immediately after manufacturing," *Joule*, Sep, 2021.
- [3] Rob J Hyndman and George Athanasopoulos Monash University, Australia. [E-book] "Forecasting: Principles and Practice"