

다중선형회귀모델 기반 고출력 직렬 배터리 팩의 전압 불균형 추정

Multiple linear regression model-based voltage imbalance estimation for high-power series battery pack

김 승 우*, 이 평 연*, 한 동 호*, 김 종 훈*

Seung-Woo Kim*, Pyeong-Yeon Lee*, Dong-Ho Han*, Jong-hoon Kim*

Abstract

In this paper, the electrical characteristics with various C-rates are tested with a high power series battery pack comprised of 18650 cylindrical nickel cobalt aluminum(NCA) lithium-ion battery. The electrical characteristics of discharge capacity test with 14S1P battery pack and electric vehicle (EV) cycle test with 4S1P battery pack are compared and analyzed by the various of C-rates. Multiple linear regression is used to estimate voltage imbalance of 14S1P and 4S1P battery packs with various C-rates based on experimental data. The estimation accuracy is evaluated by root mean square error(RMSE) to validate multiple linear regression. The result of this paper is contributed that to use for estimating the voltage imbalance of discharge capacity test with 14S1P battery pack using multiple linear regression better than to use the voltage imbalance of EV cycle with 4S1P battery pack.

요 약

본 논문에서는 18650 원통형 NCA 리튬이온 배터리로 구성된 고출력 직렬 배터리로 다양한 C-rate의 전기적 특성을 테스트한다. 테스트를 통해 추출한 14S1P 배터리 팩의 방전 용량 데이터와 4S1P 배터리 팩의 EV cycle 데이터를 통해 C-rate의 변화에 따른 전기적 특성을 분석한다. 분석을 통해 얻은 데이터를 기반으로 C-rate에 따른 방전용량 실험의 셀 간 전압 편차와 EV cycle 실험의 셀 간 전압 편차를 다중선형회귀 모델로 추정하여 선형적인 특징을 가진 데이터와 비선형적인 특징을 가진 데이터에 대한 각각의 추정성능을 검증한다. 모델의 추정성능을 검증하기 위해 추정 데이터와 실제 데이터의 RMSE를 구해 알고리즘의 정확성을 평가한다. 논문의 결과는 14S1P 배터리 팩의 방전 용량의 셀 간 전압 불균형과 4S1P 배터리 팩의 EV cycle의 셀 간 전압 불균형 중 선형적인 데이터인 방전 용량의 셀 간 불균형 데이터의 추정 성능이 더 뛰어난 것을 검증하는데 기여한다.

Key words : Li-ion battery, Battery pack, C-rate, Cell-to-Cell deviation, Multiple linear regression model

* Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University

★ Corresponding author

E-mail : whdgns0422@cnu.ac.kr, Tel : +82-42-821-5657

※ Acknowledgment

This work was supported by Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) grant funded by the Korea government (MOTIE) (20182410105280)

Manuscript received Mar. 13, 2019; revised Mar. 16, 2019; accepted Mar. 21, 2019.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서론

최근 화석 연료의 고갈 및 환경오염으로 인한 문제가 대두되면서 그에 따른 에너지 및 오염에 대한 규제가 강화되고 있다. 그에 따라 친환경 운송 수단인 전기 자동차(electric vehicle : EV) 및 전기 자전거(E-bike) 등의 어플리케이션의 사용량이 지속적으로 증가하고 있는 추세이다. 어플리케이션의 성능을 높이기 위해서 에너지를 효율적으로 저장하기 위한 고용량, 고출력 배터리 팩이 필요하며 그에 가장 적합한 배터리가 대중적으로 전 세계에서 사용되고 있는 리튬이온 배터리다. 리튬 이온 배터리는 높은 에너지 밀도와 전력 밀도, 가벼움, 내구성, 친환경성 등의 장점으로 전기 자동차의 배터리로 주로 사용되고 있지만 과충전, 과방전에 매우 민감하다는 단점을 가지고 있어 셀 간의 불균형으로 인해 과열 및 폭발 등의 안정성에 문제를 일으킬 수 있다.

배터리 팩의 성능 및 안정성에 대한 문제를 해결하기 위해서는 단위 셀의 용량을 효율적으로 사용하고 각 셀 간의 불균형을 방지하기 위한 밸런싱이 필요하다. 직렬로 연결된 배터리 팩의 용량은 배터리 팩의 내부 단일 셀의 SOC의 차이에 따라 결정된다. 따라서 SOC의 불일치는 배터리 팩의 용량의 감소와 직결되는 문제점으로 SOC의 일치는 배터리 팩의 성능 향상을 위한 필수적인 과제다. 셀 SOC의 균형을 맞추기 위해서 초기 제작 과정에서 같은 조건으로 배터리를 제작하더라도 내부 저항의 크기, 배터리의 구성 물질, 제작 환경에 의해 미세하게 용량, 내부 파라미터에 차이가 불가피하게 존재한다. 이 미세한 차이로 인해 배터리의 셀 간 불균형이 발생하게 되고 배터리를 사용하면서 노화가 진행됨에 따라 열화가 발생하게 되어 배터리의 성능 및 안정성, 내구성에 문제가 발생 할 수 있다[1]. 또한 각각의 셀을 선별 방법으로 최적화한다 하더라도 배터리의 위치에 따른 온도, 습도, 연결 상태 등의 외부 환경의 영향으로 모든 배터리가 같은 충/방전 특성을 갖는 것은 불가능하기 때문에 배터리 팩의 노화에 따라 셀 간 편차가 발생하게 된다.

노화에 따른 셀 간 전압 편차를 방지하기 위해서 최적화 이후의 셀 간의 밸런싱을 위한 방법으로는 배터리 관리 시스템(Battery Management System :

BMS)의 기능으로써 액티브, 패시브 밸런싱이 존재한다. 액티브 밸런싱은 트랜스를 활용하여 절연, 개별적으로 충전하는 방식으로 각 셀을 개별 충전하여 충전 시간에 제약이 없고 절연 구조로 안전성이 높다는 장점이 있다. 그러나 구성회로가 복잡하고 단가가 비싸다는 단점에 의해 상업적인 배터리에 사용하기 어렵기 때문에 대부분 패시브 밸런싱을 사용하는 추세다. 패시브 밸런싱은 낮은 전압의 셀에 맞춰 나머지 셀의 전류를 저항을 통해 소비시키는 방법으로 회로 구성이 액티브 밸런싱에 비해 간단하고 단가가 저렴하다는 장점이 있지만 전류를 낭비하기 때문에 효율성이 떨어진다는 단점이 있다[2]. 이러한 단점 때문에 밸런싱 기법 이전에 배터리 팩의 각각의 단위 셀을 최적화하여 단위 셀의 효율성을 증가시키고 셀 간 전압 편차의 전기적 특성 분석 및 셀 간 전압 편차의 추정을 통해 배터리 팩의 셀 간 불균형에 대해 모니터링 할 필요가 있다.

II. C-rate에 따른 14S1P 배터리 팩

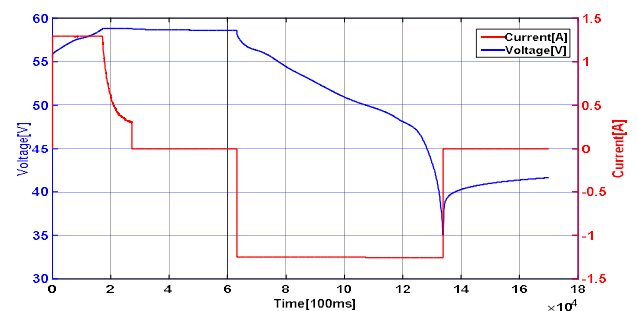


Fig 1. Current and voltage profile of capacity test.

그림 1. 용량 실험의 전류 및 전압 프로파일

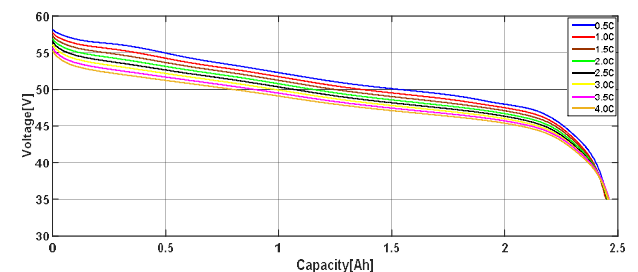


Fig 2. Voltage-discharge capacity graph by C-rate.

그림 2. C-rate에 따른 전압 - 방전 용량 그래프

본 논문에서는 원통형 NCA INR-18650 25R로 14S1P 배터리팩을 구성하였다. 배터리 팩의 사양은 정격용량 2.5Ah, 정격전압 3.6V이며 전기적 특성 실험을 상온(25°C)에서 수행하였다. 각각의 어

플리케이션 특성마다 인가되는 전류가 다르기 때문에 C-rate에 따른 배터리 팩의 전기적 특성 실험을 통해 배터리팩의 C-rate에 따른 전기적 특성을 분석한다. 그림 1의 실험을 통해 전기적 특성을 측정하고 방전 용량 실험을 진행한다. 충전 C-rate는 공통적으로 1C가 인가되며 방전 C-rate는 0.5C, 1C, 1.5C, 2C, 2.5C, 3C, 3.5C, 4C로 진행된다.

1. 전기적 내부 특성 분석

가. C-rate별 방전 곡선

14S1P 배터리 팩의 C-rate 따른 전압-방전용량 그래프를 그림 2에서 나타낸다. 그림 2에서 C-rate에 따라 방전이 진행되면서 배터리의 전압은 약 1.07%씩 감소하는 경향성을 보이고 있으며 표 1에서 배터리팩의 용량 변화는 0.5C와 1C 사이에서 최대인 0.323%의 변화를 보인다. 표 1에서 C-rate에 따른 방전용량의 변화는 경향성을 나타내고 있지 않은 것을 확인 할 수 있다. 이를 통해 C-rate의 변화가 방전 용량에 미치는 영향이 미미하다는 것을 알 수 있다.

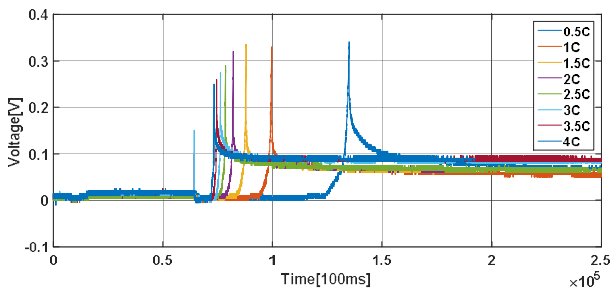


Fig 3. Cell-to-Cell voltage deviation graph by C-rate.

그림 3. C-rate에 따른 셀 간 전압 편차 그래프

Table 1. Discharge capacity by C-rate.

표 1. C-rate에 따른 방전 용량

C-rate	Capacity
0.5C	2.454544(Ah)
1C	2.446605(Ah)
1.5C	2.450694(Ah)
2C	2.451777(Ah)
2.5C	2.453037(Ah)
3C	2.455391(Ah)
3.5C	2.461766(Ah)
4C	2.459804(Ah)

나. C-rate별 셀 간 전압 편차

배터리팩의 C-rate의 변화에 따라 그림 3의 전압 편차는 만방 구간에서만 일어나는 것이 아닌 만방 후의 휴지 2시간 동안에서 일어나는 것도 표 2에서 나타내었다. 휴지 2시간 동안의 전압 편차는 그 값이 만방에서의 전압 편차보다는 적으나 지속적으로 전압 편차가 나타나고 있기 때문에 전압 편차가 배터리팩의 불균형에 2시간 이상의 오랜 시간 동안 영향을 줄 수 있는 것을 확인하였다. 또한 만방에서의 전압 편차는 C-rate가 증가 할수록 평균 3.6%씩 감소하는 경향성을 보이며 휴지 2시간 동안의 셀 간 전압 편차는 0.5C에서 2.5C까지 0.060 - 0.070[V]까지의 셀 간 편차를 3C에서 4C까지는 0.085 - 0.090[V]로, 3C 이후에 셀 간 편차가 상승하는 경향성을 보인다. 휴지 2시간 구간의 셀간 전압 편차에서 2.5C와 3C 사이의 전압 편차가 약 0.02[V] 상승한다.

Table 2. Maximum voltage deviation by C-rate.

표 2. C-rate에 따른 최대 전압 편차

C-rate	Full-Dis[V]	Rest-2h[V]
0.5C	0.3350	0.070
1C	0.3250	0.060
1.5C	0.3300	0.065
2C	0.3200	0.070
2.5C	0.2900	0.070
3C	0.2700	0.085
3.5C	0.2600	0.090
4C	0.2500	0.090

2. 4S1P 배터리 팩의 EV Cycle 실험

충/방전이 빈번한 배터리 팩의 특성 상 노화가 진행됨에 따라 셀 간 전압 편차가 증가하고 이에 따라 용량 및 수명 단축, 배터리의 손상과 같은 문제가 발생한다. 전압 편차에 따른 문제를 방지하기 위해서는 각각의 어플리케이션에 맞는 C-rate에 따른 전압 편차의 측정과 전기적 특성의 이해가 필요하며 본 논문에서 사용되는 EV Cycle은 실제 차량의 운전 패턴에 따른 배터리 팩의 충/방전을 모방한 프로파일로써 배터리 팩을 실제 EV와 같은 조건의 충/방전 실험을 진행 할 수 있도록 한다. 실험을 통해 EV Cycle에 따른 배터리 팩의 급격한 충/방전

전류가 셀 간 전압 편차에 미치는 영향을 관측하고 다중선형회귀분석을 사용하여 배터리 팩의 셀 간 전압편차를 추정한다. 또한 알고리즘의 전압 편차에 대한 추정 성능을 테스트하여 배터리 팩의 전압 불균형 모니터링에 적합한 알고리즘인지 분석한다.

가. 실험 조건

방전 용량 실험의 만방에서의 단일 셀 간에서의 전압 편차를 측정하고 추가적으로 충/방전이 빈번하게 급변하는 EV cycle에서의 C-rate의 변화에 따른 파라미터의 변화에 대해서 측정한다. 실험에 사용되는 배터리팩은 INR-18650 25R 셀로 구성된 4S1P 직렬 배터리 팩이며 각각의 셀의 SOC는 80%,

78%, 76%, 74%로 2%씩 차등을 주어 셀의 변화를 측정한다. C-rate는 1C, 2C, 3C, 4C로 각각의 배터리의 최대 충/방전 전압인 2.5A, 5A, 7.5A, 10A로 전기적 특성 실험을 진행한다. 그림 4는 차례대로 1C, 2C, 3C, 4C로 충/방전이 진행된 EV cycle의 실험결과다. 배터리 팩은 외부 온도에 따라 민감하게 반응하기 때문에 온도의 영향이 미치지 않도록 챔버 내부의 온도를 상온 25℃로 유지하여 배터리 팩의 실험을 진행하였다. INR-18650 25R 리튬이온 배터리의 최대 충전 전류는 4A, 최대 방전 전류는 20A로 EV 프로파일은 최대 충전 전류를 초과하지만 충/방전이 빈번하게 반복되는 EV cycle의 특성상 충/방전이 짧은 시간동안 진행되어 안정성에 큰

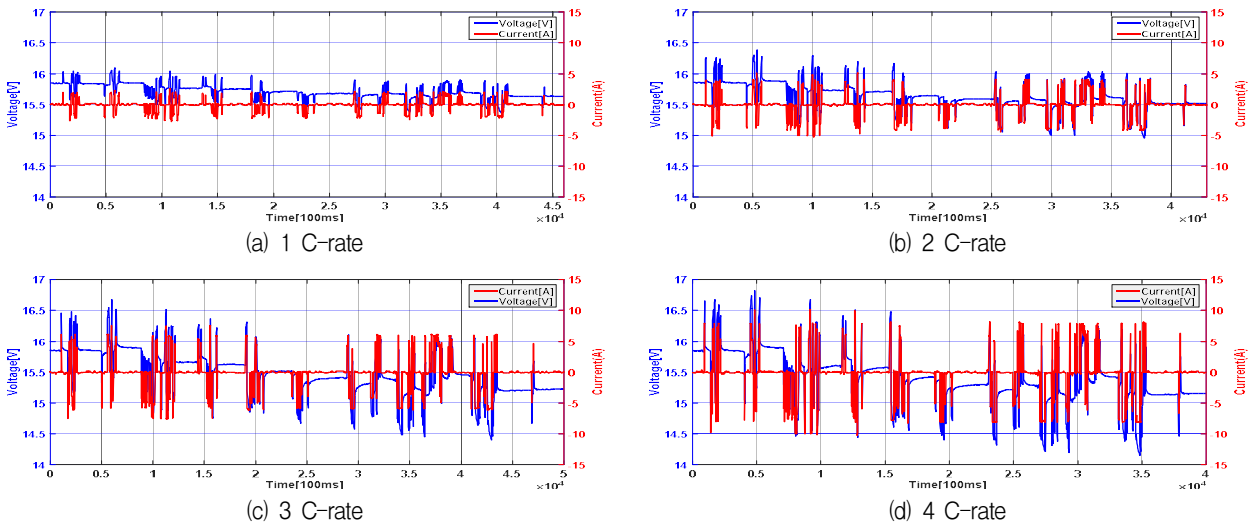


Fig 4. The experiment result of current/voltage of EV cycles by C-rate.

그림 4. C-rate에 따른 EV Cycle의 전류/전압 실험결과

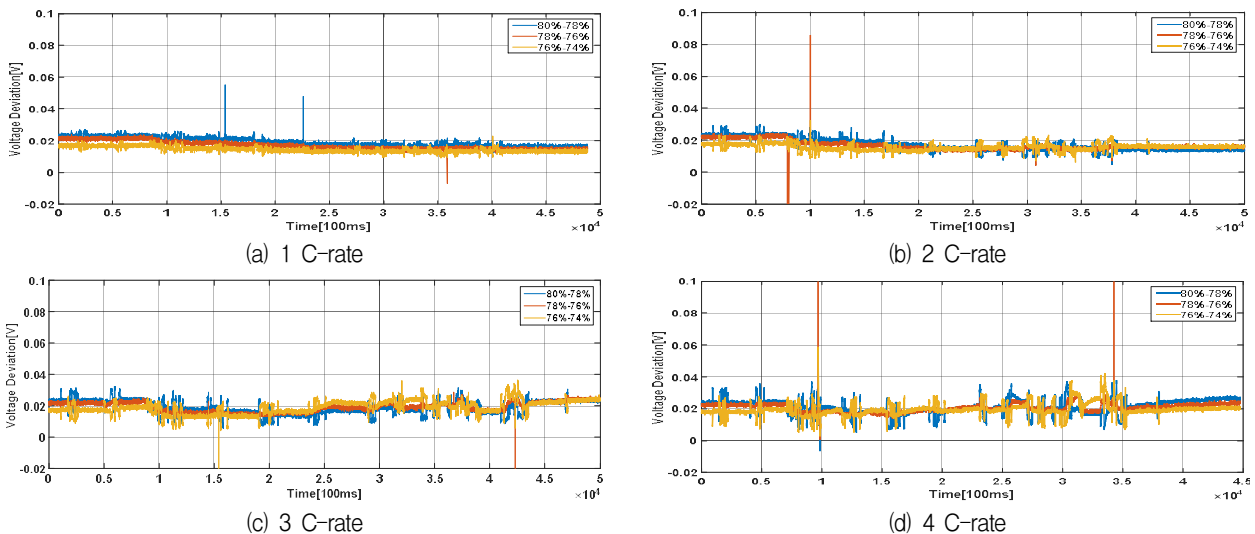


Fig. 5. Cell-to-Cell voltage deviation by C-rate.

그림.5 C-rate에 따른 셀 간 전압 편차

영향은 없고 고C-rate의 전압 편차 특성을 보여줄 수 있기 때문에 배터리의 초과 전압으로 실험을 진행하도록 한다.

나. 실험 결과

그림 4의 전기적 특성 실험을 통해 산출된 배터리 팩의 C-rate에 따른 각 셀 간 전압 편차를 그림 5의 (a), (b), (c), (d)에 나타내었다. 그림 5의 (a), (b), (c), (d)는 C-rate에 따른 각 셀 별 전압 편차며 그림 6은 C-rate에 따른 최대 전압인 SOC 80%와 최소 전압인 SOC 74%의 셀의 전압 편차를 나타낸다. 이상치를 제외한 그림 6의 각 C-rate의 변화에 따른 최대 전압 편차는 1C - 0.0645[V], 2C - 0.0675[V], 3C - 0.077[V], 4C - 0.082[V]로 충/방전 전류의 증가에 따라 전압 편차가 증가하는 것을 확인할 수 있으며 또한 노이즈는 C-rate 전류와 비례하게 증가함을 볼 수 있다. 그림 6의 1C와 2C 실험의 최대, 최소 셀 간 전압 편차는 충/방전에 따라 실험 초반과 후반의 셀 간 전압 편차가 일정하게 안정된 상태를 보이지만 3C와 4C 실험은 실험 초반에는 1C, 2C 실험과 비슷하게 안정된 전압 편차를 보이다가 실험 중반 이후부터 불규칙적으로 전압의 편차가 상승하는 경향성을 보인다. 이를 통해 C-rate가 상승함에 따라 셀 간 전압 편차가 불규칙적으로 점차 상승하는 것을 확인할 수 있다.

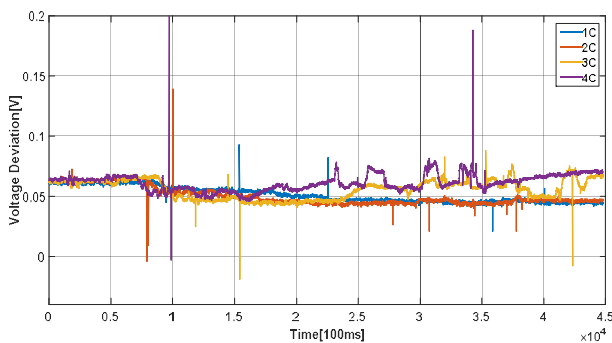


Fig. 6. Max-Min voltage deviation by C-rate.

그림 6. C-rate에 따른 최대 - 최소 전압 편차

3. 다중선형회귀분석

본 논문에서 사용되는 다중선형회귀분석은 두 가지 이상의 독립 변수들과 하나의 종속변수의 선형적인 관계를 파악하기 위한 분석방법으로 회귀분석에 사용 될 독립변수인 그림 4의 최대/최소 셀 간 전압 편차 2C, 3C, 4C를 통해 종속변수인 1C의

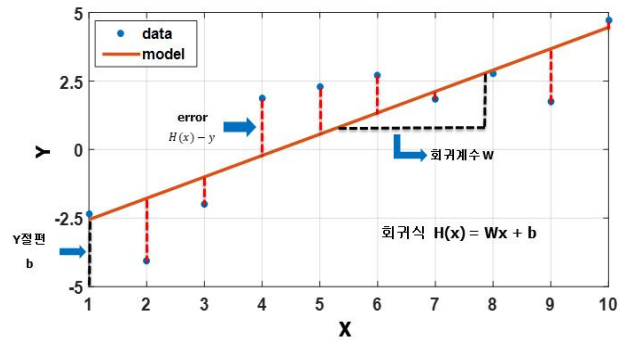


Fig. 7. Example of linear regression analysis.

그림 7. 선형회귀분석의 예시

셀 간 전압 편차를 추정한다. 다중선형회귀분석을 통하여 C-rate의 변화에 따른 셀 간 전압 편차의 변화를 추정하고 이를 통해 EV 배터리 팩의 BMS의 밸런싱을 위한 모니터링 알고리즘에 적합하지 검증한다. 다중선형회귀분석에 대한 식은 다음과 같다[3].

$$H(x_1, x_2, x_n) = w_1x_1 + w_2x_2 \dots + w_nx_n + b \quad (1)$$

식(1)은 다중선형회귀모형을 일반화한 식이다. 그림 7은 선형회귀모델의 예시이며 독립변수인 파란색 점의 관계를 통해 선형회귀모델인 빨간색 그래프를 찾는 것이 선형회귀분석의 목표이다. 그림 7의 선형회귀모델의 독립 변수의 개수를 확장하여 독립변수 $x_n^{(i)}$ 와 종속변수 H 의 관계를 알아보기 위한 분석 기법이 다중선형회귀분석이며 두 변수 사이의 인과관계를 나타내기 위한 방법이다. w_n 이 회귀변수, b 가 y절편을 나타낸다. 여기서 y절편은 평균이 0이며 표준편차가 0이라고 가정한다. 추가적으로 독립변수를 도입함으로 오차항의 값을 줄여나 갈 수 있다. 단순 선형회귀분석은 변수가 오직 하나 일 때 발생하는 부정확성과 독립변수를 누락시킴으로 다중선형회귀 모형은 이런 단점들을 다수의 독립변수를 통해 해결할 수 있다.

$$Cost(W,b) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (H(x_1^{(i)}, x_2^{(i)} \dots x_n^{(i)}) - y^{(i)})^2 \quad (2)$$

식(2)는 선형회귀분석의 회귀 계수를 추정하기 위한 추정 방법 중 가장 기본적인 방법인 최소평균 제곱법으로 식(2)의 추정값과 실측값의 오차 제곱합을 최소화하는 회귀 계수를 계산한다. 그림 7은 선형회귀 모델의 예시로서 빨간색 선인 선형회귀

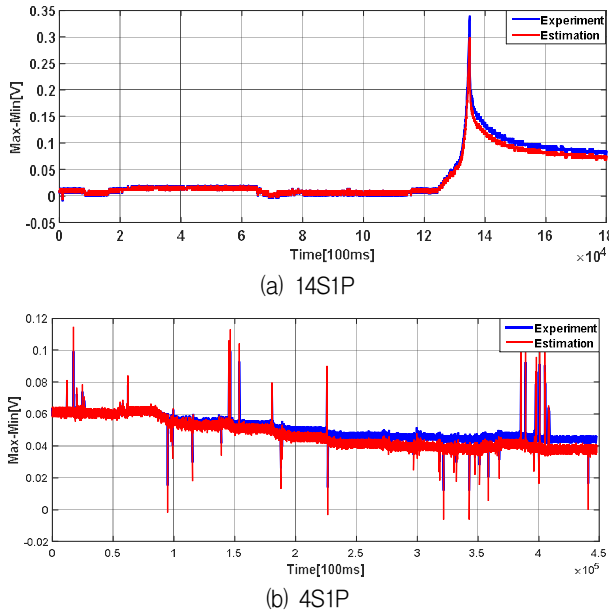


Fig. 8. Actual and estimated voltage deviation.
그림 8. 실제 및 추정 전압 편차

모델과 파란색 점인 독립변수 간의 오차가 가장 최소가 되는 그래프를 찾는 방법이다.

$$W_{i+1} = W_i - \alpha \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (Wx^{(i)} - y^{(i)})x^{(i)} \quad (3)$$

식(3)은 경사하강법(Gradient descent method) 알고리즘으로 많은 머신러닝의 오차를 최소화하는 일반적으로 사용되는 식이다. 최소평균제곱법으로 오차를 최소화하여 W , b 를 산출 할 수 있다. 초기 기울기 W_i 를 구하고 cost function의 편미분을 통해 다음의 일정 지점의 경사도만큼 이동한 W_{i+1} 를 구하는 것을 반복하여 최종적으로 기울기가 0에 가까운 오차를 구하는 방식이다. α 는 학습율로서, 학습속도를 조절하는 상수이며 데이터에 맞게 사용자가 임의로 적절한 값으로 조정한다[4].

가. 시뮬레이션 결과

그림 3과 그림 4의 C-rate 변화에 따른 셀 간 전압 편차 데이터를 통해 14S1P 배터리 팩의 방전용량 1C 데이터와 4S1P 배터리 팩의 EV Cycle 1C 데이터를 다중선형회귀분석을 사용하여 추정한다. 그림 8의 (a)는 14S1P 배터리 팩의 C-rate에 따른 방전 용량 실험의 셀 간 전압 편차를 추정했으며 (b)는 4S1P 배터리 팩의 EV Cycle의 셀 간 전압 편차를 추정 하였다.

나. 추정 성능 평가

다중선형회귀분석을 평가하기 위한 평가 기준으로 RMSE를 정의하고 14S1P 배터리 팩의 방전용량 데이터의 셀 간 전압 편차 추정과 4S1P 배터리 팩의 EV Cycle 데이터의 셀 간 전압 편차 추정의 정확성을 확인한다[5].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [x(i) - \hat{x}(i)]^2} \quad (4)$$

다음 식(4)의 $x(i)$ 는 셀 간 전압 편차 실험의 실제 데이터 값 $\hat{x}(i)$ 는 셀 간 전압 편차 실험의 추정 값이다. $x(i) = \hat{x}(i)$ 일 경우 알고리즘의 추정 성능은 100%의 정확성을 가지며 RMSE는 0이 된다. 즉 RMSE가 0에 가까울수록 알고리즘의 성능은 높다. 14S1P 방전 용량 실험과 4S1P EV Cycle실험의 RMSE를 비교하면 각각 0.66%, 6.4%의 오차율이 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 결과적으로 동일 다중선형회귀 알고리즘을 사용하여 그림 8. (a)의 단순 선형적인 14S1P 배터리 팩의 방전 용량 실험에서의 셀 간 전압 편차 데이터와 그림 8. (b)의 충/방전이 빈번히 발생하는 4S1P 배터리 팩의 EV Cycle에서의 셀 간 전압 편차 데이터의 비교를 통해 비선형 데이터보다 선형 데이터에서 추정 성능의 정확성이 더 높은 것을 확인하였다.

III. 결론

본 논문에서는 고출력 리튬이온 18650 셀의 전기적 특성 실험 및 배터리 팩에서 C-rate의 변화에 따라 발생하는 셀 간 전압 편차에 대하여 배터리 팩의 셀 간 전압 편차를 추정하는 알고리즘에 대한 검증을 수행하였다. 14S1P 배터리 팩의 방전 용량 데이터의 추정과 급격한 충/방전이 반복 되는 4S1P 배터리 팩의 EV Cycle 데이터의 추정 성능은 각각 방전 용량 데이터의 추정이 0.66%, 충/방전이 빈번히 발생하는 전류 데이터의 추정이 6.4%의 오차율로 14S1P 배터리 팩의 선형적인 데이터 추정의 정확성이 더 높은 것을 검증하였다. 이를 통해 다중선형회귀 분석은 선형적인 데이터에 적합한 알고리즘임을 검증하였으며 비선형적인 데이터의 추정 성능을 향상시키기 위해서는 다중선형회귀 분석을 선행과제로써 추가적인 알고리즘을 접목한

개선된 형태의 알고리즘 개발을 목표로 한다.

References

- [1] Long Zhou, Yuejiu Zheng, Mingguo Ouyang, Languang Lu, "A study on parameter variation effects on battery packs for electric vehicles," *Journal of Power Sources*, Vol. 364, NO. 1 pp. 242-252, 2017. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2017.08.033
- [2] Jun Xu, Xuesong Mei, Junping Wang, "A High Power Low-Cost Balancing System for Battery Strings," *Energy Procedia*, Vol. 158, pp. 2948-2953, 2019. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.956
- [3] Tony Lemos, John H. Kalivas, "Leveraging multiple linear regression for wavelength selection," *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, Vol. 168, 15 pp. 121-127, 2017. DOI: 10.1016/j.chemolab.2017.07.011
- [4] Pengqi Gou, Jianjun Yu, "A nonlinear ANN equalizer with mini-batch gradient descent in 40Gbaud PAM-8 IM/DD system," *Optical Fiber Technology*, Vol 46, pp. 113-117, 2018. DOI: 10.1016/j.yofte.2018.09.015
- [5] Saurabh Saxena, Yinjiao Xing, Daeil Kwon, Michael Pechta, "Accelerated degradation model for C-rate loading of lithium-ion batteries," *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 107, pp. 438-445, 2019. DOI: 10.1016/j.ijepes.2018.12.016
- [6] Xiaopeng Tang, Changfu Zou, Ke Yao, Guohua Chen, Boyang Liu, Zhenwei He, Furong Gao, "A fast estimation algorithm for lithium-ion battery state of health," *Journal of Power Sources*, Vol. 396, 31 pp. 453-458, 2018. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2018.06.036
- [7] Robert R. Richardson, Michael A. Osborne, David A. Howey, "Gaussian process regression for forecasting battery state of health," *Journal of Power Sources*, Vol. 357, pp. 209-219, 2017. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2017.05.004
- [8] Masayuki Hirukawa, Artem Prokhorov, "Consistent estimation of linear regression models using matched data," *Journal of Econometrics*, Vol. 203, Issue 2, pp. 344-358, 2018.

DOI: 10.1016/j.jeconom.2017.07.006

[9] Wolfgang Bögel, Jean Pierre Büchel, Hélène Katz, "Real-life EV battery cycling on the test bench," *Journal of Power Sources*, Vol. 72, Issue 1, pp. 37-42, 1998. DOI: 10.1016/S0378-7753(97)02775-4

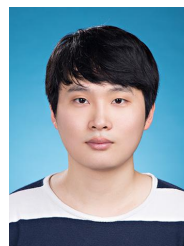
[10] Weiping Diao, Jiuchun Jiang, Caiping Zhang, Hui Liang, Michael Pecht, "Energy state of health estimation for battery packs based on the degradation and inconsistency," *Energy Procedia*, Vol. 142, pp. 3578-3583, 2017. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.12.248

[11] Caihao Weng, Yujia Cui, Jing Sun, Huei Peng, "On-board state of health monitoring of lithium-ion batteries using incremental capacity analysis with support vector regression," *Journal of Power Sources*, Vol. 235, pp. 36-44, 2013. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.02.012

[12] M. Berecibar, I. Gandiaga, I. Villarreal, N. Omar, J. Van Mierlo, P. Van den Bossche, "Critical review of state of health estimation methods of Li-ion batteries for real applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 56, pp. 572-587, 2016. DOI: 10.1016/j.rser.2015.11.042

BIOGRAPHY

Seung-Woo Kim (Member)



2019 : BS degree in railroad Electrical System, Woosong University.
2019~current : MS degree in Electrical Engineering, Chungnam National University.

Pyeong-Yeon Lee (Member)



2017 : BS degree in Electrical Engineering, Chosun University.
2019 : MS degree in Electrical Engineering, Chungnam National University.
2019~current : Ph.D degree in Electrical Engineering, Chungnam National University.

Dong-Ho Han (Member)

2018 : BS degree in Electrical Engineering, Chungnam National University.

2018~current : MS degree in Electrical Engineering, Chungnam National University.

Jong-hoon Kim (Member)

2005 : BS degree in Electrical Engineering, Chungnam National University.

2012 : Ph.D degree in Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University.

2012~2013 : Senior Researcher, ESS Development Group, Samsung SDI. 2013~2016 : Assistant professor, Chosun University. 2016~current : Assistant professor, Chungnam National University.