

직렬저항/퍼지로직 기반 배터리 선별 그룹 내 정량적 우선순위 비교 및 선정

조상우¹, 한동호¹, 최창기¹, 김재원¹, 김종훈[†]

Comparison and Selection of Quantitative Priority in Battery Screening Group Based on Series Resistance/Fuzzy Logic

Sangwoo Cho¹, Dongho Han¹, Changki Choi¹, Jaewon Kim¹, and Jonghoon Kim[†]

Abstract

In increasing the safety and usage of lithium-ion battery packs, reducing the parameter deviation between cells, such as voltage and temperature within the battery pack, is important. In this study, we propose a screening method to reduce parameter deviation between cells in battery packs. Screening algorithms are constructed based on Fuzzy logic and quantitatively express the similarities between battery cells. Screening is applied by utilizing series resistance components after experiments of electrical characteristics that consider the operation status of battery packs. After screening, the standard deviation of series resistance components according to the similarity ranking is compared and analyzed, and their conformity are verified with the algorithm parameters.

Key words: Lithium-ion battery, Parameter deviation, Screening, Fuzzy logic, Series resistance

1. 서 론

신재생 에너지의 중요성이 대두됨에 따라 리튬 이온 배터리(Lithium-ion battery)는 매우 다양한 분야에서 중요한 에너지 공급원이 되었다. 증가한 애플리케이션 종류에 따라 요구되는 배터리의 특성이 다르기 때문에 목적성에 맞는 배터리 선별의 중요성 및 필요성이 부각되고 있다^[1]. 예를 들어, 전기자동차(Electric Vehicle, EV)의 배터리 시스템은 순간적인 동력을 얻기 위한 고출력 시스템으로 설계되어야 하며, 우주용 애플리케이션의 경우 장기간 유지 및 보수의 어려움에 따른 고용량 배터리 시스템 탑재가 요구된다^{[2]-[3]}. 애플리케이션별 배터리 요구 사양의 다양성 외에도 안전 문제의 측면에서

배터리 선별 과정은 중요하게 작용한다. 배터리 팩(Battery pack) 설계 시, 배터리 팩 내부 셀 간 전압, 저항, 용량 등의 파라미터 편차(Parameter deviation)가 발생한 배터리 셀(Battery cell)들로 구성하여 불균형 상태가 되면 이는 과충전, 과방전, 발화 등의 안전 문제로 이어져 배터리 시스템의 안전한 운용에 유해한 영향을 끼친다^{[4]-[5]}. 추가적으로 배터리 시스템 운용 중의 불균형 발생은 배터리 열화를 가속시켜 전체 배터리 시스템의 신뢰성 및 안정성이 감소하게 된다^[6]. 이러한 이유로 배터리 팩 제작 시 동일 제조사에서 동일한 날짜에 제조된 배터리 셀을 사용하여 배터리 모듈(Battery module) 및 팩을 제작한다^[7]. 하지만, 동일한 날짜에 제조된 셀이라도 내부 전기화학적 특성이 상이하므로 저항, 용량, 전압 등의 파라미터가 균일하지 않다^[8]. 따라서, 효율적이고 안전한 배터리 시스템 구성을 위한 배터리 선별 방법이 필요하다.

애플리케이션에 적합한 리튬이온 배터리를 선별하는 과정을 스크리닝(Screening)이라 지칭하며 스크리닝에는 다양한 방법이 존재한다. 배터리 모델링(Battery modeling)을 통한 용량 및 저항 성분을 단계적으로 고려한 스크리닝 방법이 있다. 전기적 특성 실험 이후 직렬로 연결된 배터리 팩 모델링을 이용해 추출된 특성

Paper number: TKPE-2022-27-2-8

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: whdgns0422@cnu.ac.kr, Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University, Korea

Tel: +82-42-821-5657 Fax: +82-42-821-7606

¹ Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University, Korea

Manuscript received Sep. 4, 2021; revised Oct. 5, 2021; accepted Dec. 20, 2021

— 본 논문은 2021년 전력전자학술대회 우수추천논문임

파라미터의 분산을 기준으로 스크리닝하는 방법이다. 이 방법의 경우 스크리닝의 정확도는 배터리 모델링과 높은 상관성을 지닌다^[9]. 배터리 모델 복잡도가 증가할수록 스크리닝 정확도가 높아질 수 있으나 이와 동시에 계산량도 증가하는 단점이 있다. K-평균 군집화(K-means Clustering, KC)를 활용한 스크리닝 방법도 있다. KC는 주어진 데이터를 K개의 군집으로 묶는 알고리즘으로 각 군집 중심에서 개별 데이터 간의 거리가 최소가 되는 지점을 인공 지능(Artificial Intelligence, AI) 학습을 통해 탐색한다^[10]. AI 학습 기반 스크리닝 방법 중 서포트 벡터 머신(Support Vector Machine, SVM)을 활용한 스크리닝 방법도 있다. SVM 스크리닝은 결정 함수를 통한 경계를 지정하여 경계로부터 어느 영역에 포함되는지 분류하는 스크리닝 방법이다^[11]. 이와 같은 AI 학습 기반 스크리닝 방법들은 군집화 및 분류에 뛰어난 성능을 보이지만 데이터 간의 유사성을 판별하기에는 제한적이다.

본 논문에서는 이와 같은 점들은 보완한 Fuzzy logic 기반 스크리닝 방법을 제안한다. 배터리 팩 운용 시에 나타날 수 있는 셀 간 파라미터 편차로 전류 및 부하 상태 변화에 따른 직렬저항 성분을 반영한다. 전기적 특성 실험을 통해 추출한 직렬저항 성분을 Fuzzy logic 기반 스크리닝 알고리즘의 파라미터로 사용하여 스크리닝을 진행하고 배터리 셀 간 유사성을 정량적 수치화한다. 그리고 유사성 순위에 따른 스크리닝 파라미터의 표준 편차 분석을 통해 스크리닝 알고리즘의 성능을 검증한다. 2장에서는 배터리 특성 파라미터 추출을 위한 전기적 특성 실험을 설명한다. 3장에서는 Fuzzy logic 알고리즘 동작 원리 및 수식을 서술하며 알고리즘 동작 결과물에 대하여 설명한다. 4장에서는 스크리닝 결과 및 유사성 순위를 분석한다. 끝으로 5장에서는 본 논문의 스크리닝 방법 연구 결론을 서술한다.

2. 전기적 특성 실험 및 파라미터 추출

2.1 전기적 특성 실험

스크리닝 알고리즘의 파라미터를 추출하기 위해 전기적 특성 실험을 진행한다. 본 연구를 위해 사용한 배터리 셀은 SAMSUNG SDI INR18650-29E로 배터리의 특성은 표 1에 나타난다. 총 489개의 배터리 셀을 실험하며 모든 배터리 셀에 대해 동일 환경 조건에서 실험을 진행한다. 전기적 특성 실험의 전류 및 전압 프로파일은 그림 1에 나타난다. 배터리 운용 상황을 고려한 파라미터 추출을 위해 정전류-정전압 충전으로의 만충을 실시하고 1시간의 휴지 기간 후 배터리 충전 상태 SOC(State-of-Charge, SOC) 45% 영역까지 정전류 방전을 실시한다. SOC 45% 영역 도달 후 배터리 안정화를 위한 1시간의 휴지 기간 후 파라미터 추출 프로파일을 배터리 셀에 인가하였다. 파라미터 추출을 위한 프로파일의

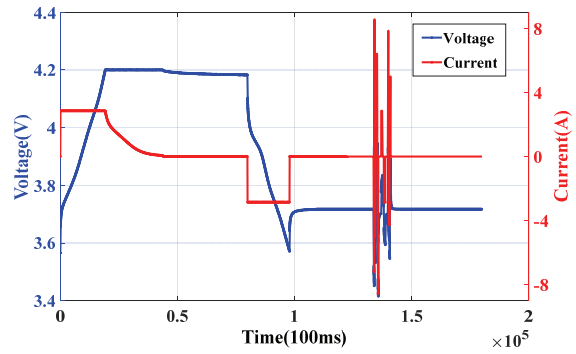


Fig. 1. Test profile for battery screening.

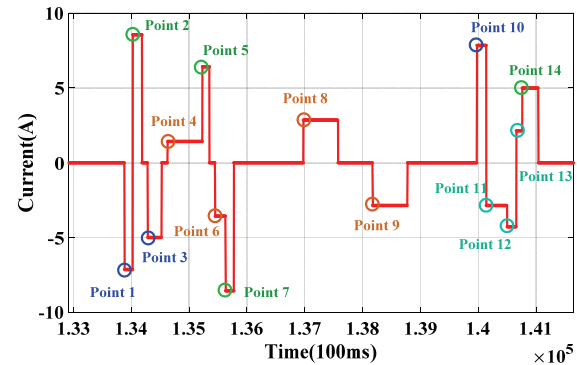


Fig. 2. Details of test profile for parameter extraction.

TABLE I
CELL SPECIFICATION

Item	Specification
Nominal capacity	2,850 [mAh]
Nominal voltage	3.65 [V]
Charge cut-off voltage	4.20 ± 0.05 [V]
Standard charge current	1,375 [mA]
Max. Charge current	2,750 [mA]
Max. Discharge current	2,750 [mA]
Discharge cut-off voltage	2.5 [V]

세부 사항은 그림 2에 나타난다.

2.2 스크리닝 파라미터 추출

배터리 모델링을 통해 스크리닝 알고리즘의 파라미터를 추출한다. 본 논문에서는 1개의 직렬저항 성분만 있는 전기적 등가 회로 모델(Electrical Equivalent Circuit Model, EECM)을 구성하며 그림 3과 같다. 그림 3의 EECM은 1개의 전압원(Open Circuit Voltage, OCV)과 1개의 직렬저항 성분(R_s)으로 구성된다. V_t 는 충·방전기에서 측정된 배터리 단자 전압이다. 단일 저항으로 구성된 EECM의 특성상 인가되는 전류의 크기가 바뀌는 시점에서만 배터리 변화를 모사할 수 있기에 전류 인가 양상이 변화하는 시점에서만 파라미터를 추출한다. 그림 2에 나타나듯이 전류 인가 양상이 변화하는 지점은 총 14

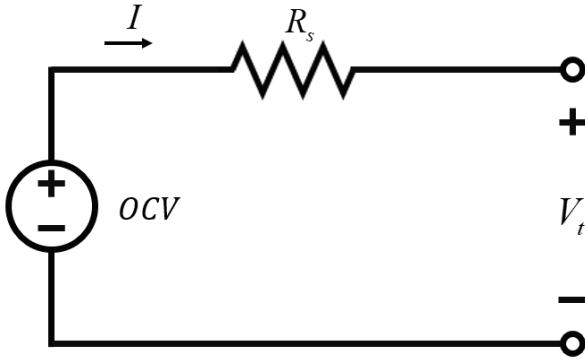


Fig. 3. Electrical equivalent circuit model.

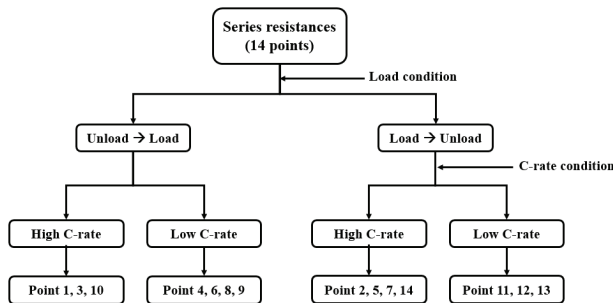


Fig. 4. Case classification of series resistances by load conditions and C-rate conditions.

개의 지점이며 부하 조건(Load conditions) 및 전류의 크기(C-rate)에 따라 4개의 경우로 집단을 분류한다. 그림 4는 부하 조건 및 전류의 크기에 따른 파라미터 분류를 나타낸다. 분류 후 각 지점의 직렬저항 성분은 식 (1)과 같이 단자 전압을 전류로 나눈 값으로 계산된다.

$$R_s = \frac{V_t}{I} \tag{1}$$

3. Fuzzy logic 기반 스크리닝 알고리즘

3.1 소속 함수

Fuzzy logic은 인간이 설정한 규칙을 기반으로 이분법으로 표현이 모호한 것들을 정량적으로 표현 가능한 방법이다. 소속도의 불확실성을 숫자로 표현하기 위해 소속 함수(Membership Function, MF)를 정의한다. MF로 정의된 집합의 값은 0부터 1 사이의 값으로 표현 가능하며 이는 각 집합에 대한 소속도(Degree of membership)를 의미한다. 본 논문에서는 Fuzzy 집합 정의를 세 개의 집합으로 분류한다. MF의 세 집합 $f_1(x)$, $f_2(x)$, $f_3(x)$ 는 각각 식 (2), 식 (3), 식 (4)로 계산되며 좌표평면 위에 도식화하면 그림 5와 같이 표현된다. $f_1(x)$ 에 소속되면 데이터가 작은 값에 몰려 있음을, $f_2(x)$ 에 소속되면 데이터가 중간값에 몰려 있음을, $f_3(x)$ 에 소속되면 데이터가 큰 값에 몰려 있음을 의미한다.

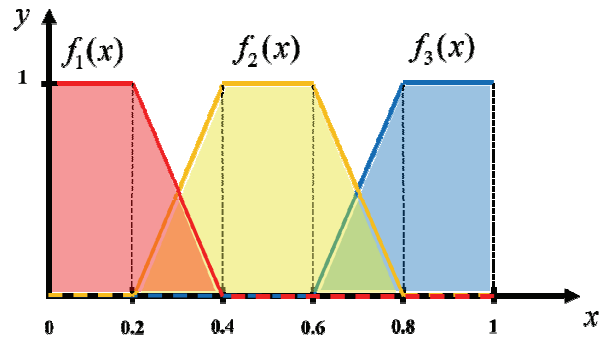


Fig. 5. Schematic of membership function for Fuzzy logic.

$$f_1(x) = \begin{cases} 1 & (0 \leq x < 0.2) \\ -5x + 2 & (0.2 \leq x < 0.4) \\ 0 & (0.4 \leq x \leq 1) \end{cases} \tag{2}$$

$$f_2(x) = \begin{cases} 0 & (0 \leq x < 0.2) \\ 5x - 1 & (0.2 \leq x < 0.4) \\ 1 & (0.4 \leq x < 0.6) \\ -5x + 4 & (0.6 \leq x < 0.8) \\ 0 & (0.6 \leq x \leq 1) \end{cases} \tag{3}$$

$$f_3(x) = \begin{cases} 0 & (0 \leq x < 0.6) \\ 5x - 3 & (0.6 \leq x < 0.8) \\ 1 & (0.8 \leq x \leq 1) \end{cases} \tag{4}$$

$$R_{s,scaler} = \frac{R_s - R_{min}}{R_{max} - R_{min}} \tag{5}$$

각 집합의 입력 변수인 x 는 전기적 특성 실험으로 추출된 직렬저항 성분이다. 직렬저항 성분을 MF에 입력하기 전에 몇 가지 데이터 정규화(Normalization) 과정을 거친다. 이는 입력 변수의 양을 줄여 계산량을 줄이고 정규화를 통한 이상치 제거를 하기 위함이다. 우선, 14개의 직렬저항 추출 지점(Point)에서 각각의 지점의 저항값들끼리 Min-max scaler를 사용하여 0부터 1 사이의 값으로 변환한다. Min-Max scaler는 식 (5)와 같이 계산되며 R_s 는 해당 지점의 직렬저항 성분, R_{max} 는 각 지점에서 가장 큰 값, R_{min} 은 각 지점에서 가장 작은 값, $R_{s,scaler}$ 는 Scaler로 변환된 값을 의미한다. Scaler를 사용한 정규화 이후 부하 및 전류의 크기에 따라 분류한 4개의 집단별 평균값을 계산하여 입력 변수 x 를 도출한다. 입력 변수 x 가 MF에 입력되면 각 집합에 포함되는 소속도를 얻게 된다.

3.2 역퍼지화

Fuzzy logic 알고리즘은 역퍼지화(Defuzzification) 과정을 거쳐 입력 변수에 대한 MF의 결과를 정략적 수치화한다. 역퍼지화 과정을 통해 언어적 표현과 정략적 수치를 결합한 표현이 가능하다. 또한, 타겟 셀 개수에 부합하는 우선순위 비교 및 배터리 셀 선별이 가능하다. 소속도와 언어적 표현 결합을 위한 집단 분류 규칙은

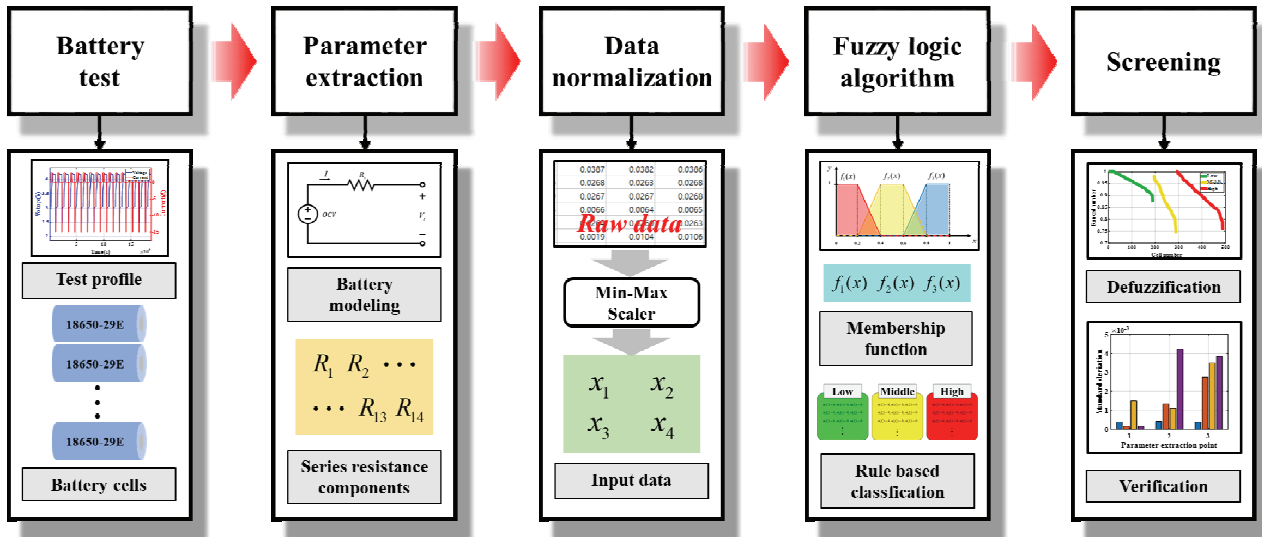


Fig. 6. Fuzzy logic based screening process.

표 2와 같다. MF 집합별 원소의 개수 $n(f_n)$ 가 집단 분류 규칙이 된다. 각 집단은 언어적 표현으로 (저항 편차가) 작음(Low), (저항 편차가) 적당함(Middle), (저항 편차가) 큼(High)으로 분류한다. 분류된 집단별 소속도를 도출하기 위한 역퍼지화 방법은 스게노 추론(Sugeno inference system) 방법을 사용한다. 스게노 추론은 MF의 출력을 단일 값으로 사용하여 특정 점에서는 논리값이 1, 나머지 모든 점에서는 0의 값을 갖는다. 예를 들어, 그림 5에서 x 가 0.25일 때 $f_1(x)$, $f_2(x)$, $f_3(x)$ 의 출력 중 큰 값을 사용하고 나머지 값은 버리므로 $x = 0.25$ 에 대한 MF 상수값은 0.5만 출력하는 것이다. 이는 MF에 의한 영향이 큰 값만 반영하는 스게노 추론의 특성이다. 특정 x 에서 채택된 MF 출력값들은 가중 평균(Weighted Average, WA)을 이용하여 최종적으로 역퍼지화한다. 가중 평균은 식 (6)과 같이 계산한다^[12]. $W(x)$ 는 x 의 가중치를 의미하며 스게노 추론에 의해 출력된 MF 상수값이다. 따라서, 4개의 파라미터 x_1, x_2, x_3, x_4 에 대한 MF 값을 대표하는 역퍼지화 값을 계산할 수 있다. 최종적으로 역퍼지화한 값들을 내림차순 정렬하여 저항 편차가 작은 순서대로 순위를 책정하여 정량적 비교를 통한 스크리닝이 가능하다. 위의 과정들을 순차적으로 Fuzzy logic 기반 스크리닝 진행되면 전체 과정은 그림 6과 같다.

$$WA = \frac{W(x_1) \cdot x_1 + W(x_2) \cdot x_2 + \dots + W(x_n) \cdot x_n}{W(x_1) + W(x_2) + \dots + W(x_n)} \quad (6)$$

4. 스크리닝 결과

본 논문에서 제안한 Fuzzy logic 기반 스크리닝 방법 검증을 위해 489개의 배터리 셀 데이터를 활용하여 스크리닝을 진행하였다. 스크리닝 진행 결과 저항 편차의

TABLE II
RULE TABLE FOR DEFUZZIFICATION

Condition	Result
$n(f_1) = 4, n(f_2) = 0, n(f_3) = 0$	Low
$n(f_1) = 0, n(f_2) = 4, n(f_3) = 0$	
$n(f_1) = 0, n(f_2) = 0, n(f_3) = 4$	
$n(f_1) = 3, n(f_2) = 1, n(f_3) = 0$	Middle
$n(f_1) = 3, n(f_2) = 0, n(f_3) = 1$	
$n(f_1) = 0, n(f_2) = 3, n(f_3) = 1$	
$n(f_1) = 1, n(f_2) = 3, n(f_3) = 0$	
$n(f_1) = 0, n(f_2) = 1, n(f_3) = 3$	High
$n(f_1) = 1, n(f_2) = 0, n(f_3) = 3$	
$n(f_1) = 2, n(f_2) = 1, n(f_3) = 1$	
$n(f_1) = 1, n(f_2) = 2, n(f_3) = 1$	
$n(f_1) = 1, n(f_2) = 1, n(f_3) = 2$	

정도에 따라 세 개의 집단으로 분류하였으며, 각 집단은 Low 190개, Middle 99개, High 200개의 배터리 셀을 포함하였다.

그림 7(a)는 스크리닝 진행 전 489개 배터리 셀의 파라미터 추출 지점에 따른 직렬저항 성분이다. 그림 7(b), 7(c), 7(d)는 각각 Low, Middle, High 집단별 파라미터 추출 지점에 따른 직렬저항 성분을 나타낸다. 스크리닝 진행 전은 6개의 지점(Point 4, 8, 11, 12, 13, 14)에서만 저항값이 유사한 반면, 스크리닝 후의 Low 집단의 경우 10개의 지점(Point 4, 5, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14)에서 저항값이 유사함을 확인하였다. Middle 집단의 경우 7개의 지점(Point 3, 4, 8, 11, 12, 13, 14)에서 저항값이 유사하였으며, High 집단의 경우 스크리닝 이전과 동일하였다.

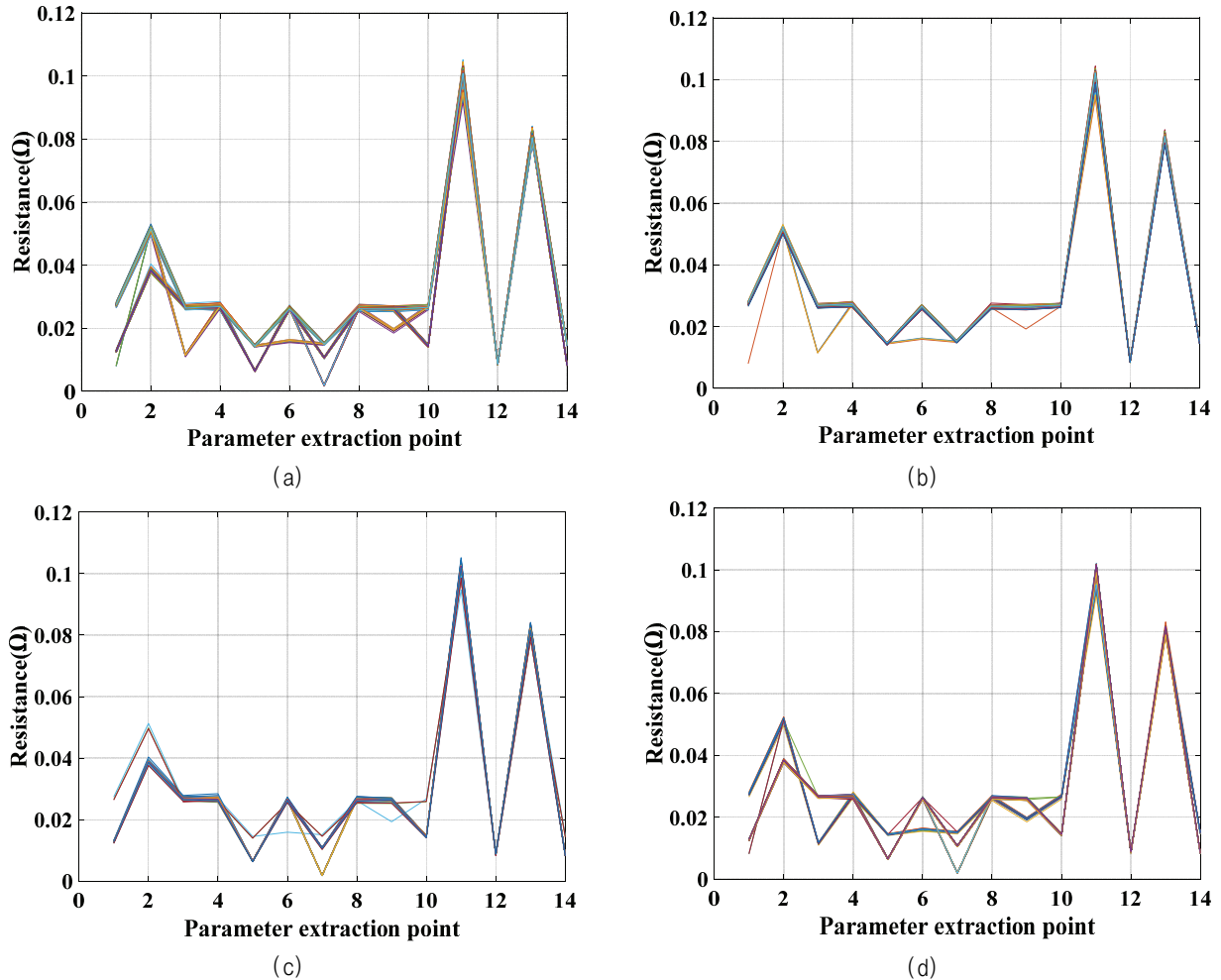


Fig. 7. Series resistance by parameter extraction point. (a) Before screening, (b) Low group, (c) Middle group, (d) High group.

본 논문의 스크리닝 파라미터는 저항 추출값을 그대로 사용하지 않고 배터리 운용 시의 거동을 고려하여 전류 및 부하 조건에 따라 재가공하여 사용하므로 스크리닝 이전에 저항값이 유사한 6개 지점 또한 스크리닝에 유의미하게 작용한다. 스크리닝 진행 전에 저항 편차가 유사한 6개 지점은 스크리닝 이후에도 유사한 저항값을 보이며 분류 집단별 지점에 따른 저항값의 편차가 다른 것을 그림 7을 통해 확인할 수 있다. 이는 모든 지점의 저항값이 스크리닝에 유의미하게 작용함을 의미한다.

그림 7의 스크리닝 후 집단에 따른 저항값을 확인하면 Low 집단의 경우 저항값이 유사하지 않은 4개의 지점은 그림 4의 배터리 운용 상황을 고려한 조건 분류에서 무부하에서 부하로 가는 지점을 나타낸다. Middle 집단의 경우 7개의 지점에서 저항값이 유사하지 않으며 해당 지점들은 그림 4에서 무부하에서 부하 조건과 부하에서 무부하 조건 중 높은 전류가 인가된 상황을 나타낸다. High 집단의 경우 Middle 집단의 지점에서 Point 3만 추가되었으며 이 지점은 그림 4에 따라 무부하에서 부하 조건 중 높은 전류가 흐르는 상황을 나타

낸다. 이는 단순히 Middle 집단이 High 집단에 비해 1개의 지점의 결과만 우수한 것을 의미하지 않는다. 본 논문에서는 스크리닝 과정을 배터리 운용 상황을 고려한 집단 분류 후 정량적 순위 비교로 구성하였다. 집단 분류는 배터리 운용 상황을 반영하였기에 집단별 타겟 셀의 개수를 설정하지 않고 진행하여 그림 4의 조건에 따라서만 분류하였다. 스크리닝 결과와 조건 분류에 따르면 Middle 집단이 Low 집단보다 1개의 지점에서만 우수한 결과를 나타낸 것은 배터리에 고전류를 인가하였을 때의 상황을 고려한 스크리닝이 잘 진행되었음을 의미한다. 결과적으로 파라미터 추출 지점별 저항값 결과를 통해 배터리 운용 시를 고려한 스크리닝이 수행되었음을 확인하였다. 또한, 배터리 운용 상황 중 무부하에서 부하로 가는 조건 중 고전류가 인가될 때 저항의 편차 발생이 심함을 확인하였으며 배터리 운용 상황을 고려한 스크리닝 시 해당 상황을 가장 우선적으로 반영하여야 효율적인 스크리닝이 가능하다는 결론 도출이 가능하다.

스크리닝 후의 집단별 저항 편차를 분석하기 위해 파라미터 추출 지점별 저항의 표준편차를 도출하였다.

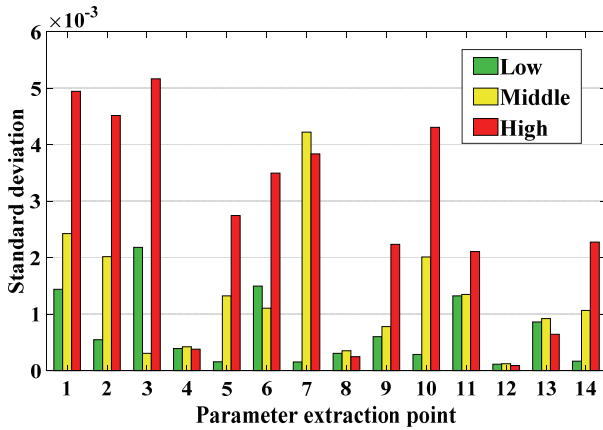


Fig. 8. Standard deviation by parameter extraction point.

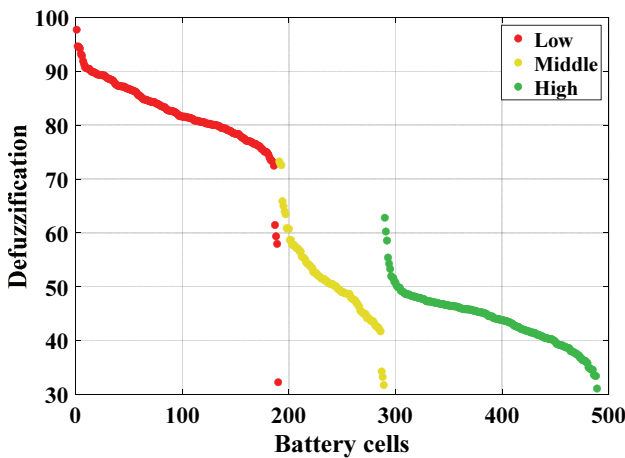


Fig. 9. Defuzzification results of fuzzy logic based screening.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (R_i - \mu)^2} \quad (7)$$

표준편차는 식 (7)과 같이 계산한다. σ 는 저항의 표준편차이며, N 은 전체 배터리 셀의 개수, μ 는 저항 평균을 의미한다.

그림 8은 파라미터 추출 지점별 저항의 표준편차를 나타낸다. 표준편차 비교결과 Low 집단이 8개의 지점(Point 1, 2, 5, 7, 9, 10, 11, 14)에서 표준편차가 가장 작은 것을 확인하였다. Middle과 High 집단의 경우 각각 2개의 지점(Point 3, 6), 4개의 지점(Point 4, 8, 12, 13)에서 표준편차가 가장 작은 결과를 나타냈다. 표준편차가 가장 큰 지점은 High 그룹에서 가장 많이 확인되었으며 해당 경우에서 12번 지점을 제외한 모든 지점에서 표준편차가 다른 두 그룹의 2배 이상이었다.

그림 9는 스크리닝 데이터를 역퍼지화하여 저항 편차 집단에 소속되는 정도를 수치화하여 내림차순한 것이며 그림 10은 각 집단별 상위 30개의 역퍼지화 결과이다. Low 집단의 경우 32.25 - 97.74의 소속도를, Middle 집단의 경우 31.72 - 73.26의 소속도를, High 집단의 경우

31.08 - 62.82의 소속도를 나타낸다. Low 집단의 경우 대부분 70 이상의 소속도를 나타내며 평균 소속도는 82.31로 매우 높은 소속도를 보인다. 각 집단별 소속도는 초기에 급격히 감소 후 선형적으로 감소하다 말기에 다시 급격히 감소하는 경향을 보인다. 이는 스크리닝을 배터리 운용 상황 조건 분류에 따른 집단 분류 후 집단 내 정량적 순위 책정의 순서로 진행하여 나타난 결과이다. 배터리 운용 조건에 따른 집단 분류는 정량적 수치가 정해지기 이전에 파라미터와 MF를 기반으로 설정된 규칙으로 인해 결정된다. 따라서, 집단 내에서 설정한 규칙 기반의 특성은 집단의 특성과 비슷하나 실제 저항값은 유사하지 않은 셀이 존재할 수 있다. 초기와 말기의 역퍼지화 값이 선형적으로 변하는 값과 큰 차이가 발생하는 이유도 이러한 이유 때문이라고 분석할 수 있다.

이 장에서 제시한 결과들을 토대로 본 논문에서 제안한 스크리닝 방법 적용 시 배터리 운용 상황을 고려한 효과적인 집단 분류가 가능하며 역퍼지화 과정을 거쳐 집단 내 정량적 순위 비교가 가능하다. 단순히 배터리 특성에 따른 집단 분류 외에 추가적으로 정량적인 수치 비교가 가능하기에 배터리 팩을 구성하는 셀 선별 시 셀 간 편차를 줄이는 데 효과적으로 작용할 수 있다. 예를 들어, 본 논문에서 연구한 스크리닝 방법을 사용 시 정해진 타겟 셀의 개수에 맞춰 특성이 비슷한 순서대로 배터리 셀 선별이 가능하다. 1장에서 설명한 K-means clustering, SVM 방법에서는 일정 범위 영역 설정에 따른 군집화를 실시하지만, 데이터 간의 유사성을 파악하기는 어려운 한계점을 지니고 있다. 그러나, Fuzzy logic 기반 스크리닝 방법은 데이터 간의 유사성을 정량적 수치를 정확하게 파악할 수 있기에 더욱 정확한 배터리 선별이 가능하다. 또한, 배터리 운용 상황을 고려하였기에 배터리 애플리케이션에 적합한 집단 내에서 셀 선별이 가능한 장점이 있다. 예를 들어 '무부하 상태에서 전류를 인가하여 순간적인 고출력이 필요한 운용 환경에서 셀 간 편차가 적은 배터리 셀 50개 선별'이라는 목적을 달성하기 위해서는 스크리닝 과정을 거친 후 Low 집단에서 역퍼지화 값이 상위 50개인 셀을 선별하면 된다. Low 집단은 그림 4의 조건과 그림 7(b)의 결과에 따라 무부하에서 부하로 변하면서 고전류가 걸리는 지점에서 저항 편차가 가장 작은 집단이며 이 중 상위 50개의 배터리 셀이 해당 특성을 가장 잘 반영한 셀이라고 볼 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 직렬저항 성분을 활용한 Fuzzy logic 기반 배터리 스크리닝 방법을 제안하였다. Fuzzy logic 알고리즘 파라미터 추출을 위해 배터리 모델링 및 전기적 특성 실험을 진행하였으며 추출된 파라미터 기반 Fuzzy logic 알고리즘을 구축하였다. Fuzzy logic 알고

리즘의 MF 및 규칙 설정을 통해 배터리 저항 성분 간의 편차 소속 집단을 분류하였으며 스케노 추론 기반 역퍼지화를 통해 정략적 우선순위 선정을 하였다. 총 489개의 배터리 셀을 스크리닝하였으며 Low, Middle, High의 3개의 분류 집단별 소속도 비교를 통해 개발된 스크리닝 방법의 성능을 검증하였다. 본 논문의 스크리닝 방법을 활용하여 배터리 애플리케이션과 타겟 셀 개수에 최적화된 배터리 셀 유사 순위 선정 및 선별이 가능하다.

이 논문은 한국전력공사 2019년 선정 기초연구 개발 과제의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (R19X001-45)

이 논문은 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2020R1F1A1076204)

References

- [1] J. S. Kim, H. Y. Chun, M. H. Kim, S. H. Han, J. W. Lee, and T. K. Lee, "Effective and practical parameters of electrochemical Li-ion battery models for degradation diagnosis," *Journal of Energy Storage*, Vol. 42, Oct. 2021.
- [2] H. He, X. Zhang, R. Xiong, Y. Xu, and H. Guo, "Online model-based estimation of state-of-charge and open-circuit voltage of lithium-ion batteries in electric vehicles," *Energy*, Vol. 39, No. 1, pp. 310 - 318, Mar. 2012.
- [3] J. A. Zaragoza-Asensio, S. Pinado, and J. Perez-Alvarez, "Li-ion battery for space missions based on COTS cells: Mechanical analysis and design," *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, Vol. 24, No. 2, pp. 311 - 317, Aug. 2021.
- [4] S. Hemavathi, "Overview of cell balancing methods for Li-ion battery," *Energy Storage*, Vol. 3, No. 2, Apr. 2021.
- [5] A. Hauser and R. Kuhn, "12 - Cell balancing, battery estimation, and safety aspects of battery management systems for electric vehicles," *Advances in Battery Technology for Electric Vehicles*, pp. 283 - 326, May. 2015.
- [6] A. Turksoy, A. Teke, and A. Alkaya, "A comprehensive overview of the DC-DC converter-based battery charge balancing methods in electric vehicles," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 133, Nov. 2020.
- [7] L. Zhou, Y. Zheng, M. Ouyang, and L. Lu, "A study on parameter variation effects on battery packs for electric vehicles," *Journal of Power Sources*, Vol. 364, pp. 242 - 252, Oct. 2017.
- [8] F. Feng, X. Hu, L. Hu, Y. Li, and L. Zhang, "Propagation mechanism and diagnosis of parameter inconsistency within Li-Ion battery packs," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 112, pp. 102 - 113, Sep. 2019.
- [9] J. Kim and B. H. Cho, "Screening process-based modeling of the multi-cell battery string in series and parallel connections for high accuracy state-of-charge estimation," *Energy*, Vol. 57, pp. 581 - 599, Aug. 2013.
- [10] Z. Zhou, A. Ran, S. Chen, X. Zhang, G. Wei, B. Li, F. Kang, X. Zhou, and H. Sun, "A fast screening framework for second-life batteries based on an improved bisecting K-means algorithm combined with fast pulse test," *Journal of Energy Storage*, Vol. 31, Oct. 2020.
- [11] Z. Zhou, B. Duan, Y. Kang, Y. Shang, N. Cui, L. Chang, and C. Zhang, "An efficient screening method for retired lithium-ion batteries based on support vector machine," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 267, Sep. 2020.
- [12] B. I. Jeon, H. C. Cho, and H. T. Jeon, "The implementation of the intelligent exoskeleton robot arm using ElectroMyogram (EMG) vital signal," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol. 22, No. 5, pp. 533 - 539, Oct. 2012.



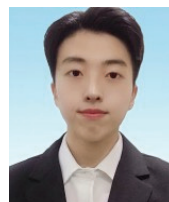
조상우(趙相禹)

1995년 2월 17일생. 2019년 충북대 기계공학부 졸업. 2021년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



한동호(韓東胡)

1992년 1월 27일생. 2018년 충남대 전기공학과 졸업. 2020년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2020년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



최창기(崔暢杞)

1995년 6월 29일생. 2020년 공주대 기계시스템공학과 졸업. 2020년~현재 충남대 전기공학과 석사과정.



김재원(金載原)

1996년 3월 21일생. 2021년 충남대 전기공학과 졸업. 2021년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



김종훈(金鍾勳)

1979년 4월 22일생. 2005년 충남대 정보통신공학부 전기전자전파전공 졸업. 2012년 서울대 전기컴퓨터공학부 졸업(공학, 석·박통합과정). 2012년~2013년 삼성SDI ES사업부 책임연구원. 2013년~2016년 조선대 전기공학과 조교수. 2016년~현재 충남대 전기공학과 부교수. 2018년~2020년 한국과학기술원(KAIST) 친환경스마트자동차연구센터 겸직교수. 2015년~현재 JPE Associate Editor. 2019년~현재 IEEE Senior Member. 당 학회 연구사업이사.