ISSN : 1226-7244 (Print)
ISSN : 2288-243X (Online)
논문번호 19-02-47
318

j.inst.Korean.electr.electron.eng.Vol.23,No.2,667~674,June 2019
http://dx.doi.org/10.7471/ikeee.2019.23.2.667

원전 비상전원 적용성 판단을 위한 다양한 C-rate 기반 원통형 리튬이온 배터리의 전기적 특성분석 및 모델링

C-rate based electrical characteristics and equivalent circuit modeling of 18650 cylindrical Li-ion battery for nuclear power plant application

김 건 우*, 박 성 윤*, 박 진 형*, 김 종 훈*★, 박 성 백**, 김 영 미**

Gunwoo Kim*, Seongyun Park*, Jinhyeong Park*, Jonghoon Kim*★,
Sungbaek Park**, Youngmi Kim**

Abstract

The recent incidents of Nuclear Power Plant(NPP) gave rise to a total power outage caused by the loss of the functions of the off-site and the emergency power supply. Currently, emergency power supply of NPP have been taken into account by Li-ion batteries instead of existing lead-acid batteries. In order to judge the applicability of the cylindrical Li-ion battery, it is necessary to analysis the results of various electrical tests. This paper investigates the basic electrical characteristics test of three types of cylindrical batteries in order to select the most suitable battery and estimate state of battery through equivalent circuit model and propose method to solve the problem.

요 약

최근 발생한 원전 사고는 소외전원 및 비상전원의 기능이 상실되어 발전소 전체 정전이 발생한 사례를 계기로 원전의 비상전원공급용 배터리의 중요성이 부각되고 있다. 현재 원전의 비상전원공급용 배터리는 기존의 납축전지를 대신하여 리튬계열 배터리로 교체가 고려되고 있는 상황이다. 이에 따라 원통형 리튬 배터리의 적용성을 판단하기 위해 여러 가지 리튬 계열 배터리의 전기적 특성 실험을 진행하여 결과를 분석해야 한다. 본 논문은 현재 ESS(Energy Storage Systems)에 많이 사용되는 세 가지 타입의 리튬 배터리의 전기적 특성실험을 통해 적절한 배터리 타입을 선정하고, 선정된 배터리가 비상전원공급용 배터리로 사용될 때 최적의 C-rate를 제안한다. 또 배터리 모델링을 통해 배터리의 상태를 추정하며 문제점을 제시한다.

Key words : Nuclear Power Plant(NPP), Emergency Power Supply Battery, Li-ion Battery, Electrical test, Equivalent Electrical Circuit Modeling(EECM)

* Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University
★ Corresponding author
E-mail : whdgns@cnu.ac.kr, Tel : +82-42-821-5657

※ Acknowledgment
This work was supported by the Nuclear Safety Research Program through the Korea Foundation Of Nuclear Safety (KoFONS), granted financial resource from the Nuclear Safety and Security Commission(NSSC), Republic of Korea. (No. 1805006)
Manuscript received Jun. 5, 2019; revised Jun. 25, 2019; accepted Jun. 29, 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 배터리는 다양한 어플리케이션에 적용되고 있으며 그에 따른 여러 가지 요구사항들이 많아지고 있다. 전기자동차, 소형 스마트기기와 같이 에너지 용량과 밀도가 높은 고용량 배터리와 주파수조정과 같이 순간적으로 강한 출력을 요구하는 고출력 배터리, 등 전력 구동용 어플리케이션으로써 용도에 따라 특성에 맞는 배터리도 다양하다[1]. 이러한 요구조건을 충족시키기 위해 여러 종류의 리튬 이온 배터리 중 NCA($LiNiCoAlO_2$), NMC($LiNiMnCoO_2$), LFP($LiFePO_4$)배터리가 많이 사용되고 있다. 이러한 배터리의 안정적 운용을 위해 전기적 특성 실험 및 분석을 바탕으로 배터리의 상태를 정확하게 추정하는 여러 가지 기법이 요구되고 있다[2].

2011년 3월 후쿠시마 원전(NPP, Nuclear Power Plant) 사고는 지진과 해일의 여파로 인해 소외전원 및 비상전원의 기능이 상실되어 발전소 전체 정전이 발생한 것이 원인이다. 설계 기준을 초과한 자연재해에 의해 후쿠시마 원전의 모든 비상전원의 이용이 불가능하게 되었고, 비상전원의 복구가 지연되면서 발생한 장기 교류전원 상실사고 대응 전력설비인 비상전원공급용 배터리의 관심이 더욱 증대되었다. 이에 따라 원전 필수 제어전원의 안정적 확보와 용량증대의 중요성이 부각되고 있는 상황이다. 원전 비상전원공급용 배터리는 타겟 부하가 불특정한 일반 비상전원공급용 배터리와는 다르게 냉각 펌프 및 제어 장치와 같은 원자력 안전 관련 부하에 전력을 공급한다.

현재 리튬계열 배터리는 기존의 납축전지보다 여러 측면에서 우수한 특성을 보이고 있다. 리튬계열 배터리는 납축전지 대비 높은 공칭전압조건을 가지고 있다. 일반적으로 3.7V의 공칭전압을 가지고 있는 리튬계열 배터리는 2V의 공칭전압을 가지고 있는 납축전지보다 약 두 배 높다. 에너지 밀도 차원에서 리튬계열 배터리는 납축전지보다 단위 부피당 약 여섯 배, 단위 무게당 약 세 배정도 성능이 좋다. 또 리튬계열 배터리의 무게가 일반적으로 더 가볍다는 점을 고려한다면 배터리의 저장 공간의 축소화나 같은 공간대비 더 큰 용량을 사용할 수 있게 된다. 납축전지 대비 리튬 계열 배터리의 큰 장점으로는 가용 온도 범위이다. 우선 납축전지의 가용 온도 범위는 -15℃에서 45℃ 사이로 알려져 있지만 상온(25℃)에서 사용되지 않고 저온이나 고온에서 사용될 경우 납축전지의 데이터 시트에 나타내어진 정보들을 온전히 사용할 수 없게 된다. 하지만 리튬계열 축전지의 가용 온도 범위는 -20℃에서 60℃이며, 사용 온도가 저온일 경우에는 배터리의 내부 특성의 변화가 눈에 띄게 나타나지만 고온의 경우에는 상온에서 사용되는 경우와 특성이 크게 달라지지 않는다[3]. 이와 같이 언급된 장점들을 바탕으로 기존의 납축전지를 대신하여 리튬계열 배터리의 사용이 고려되고 있다.

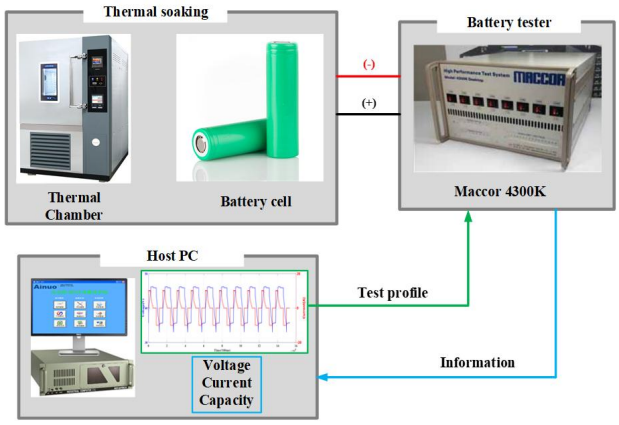


Fig. 1. Experimental setup for data extraction.
그림 1. 데이터 추출을 위한 실험 셋팅

본 논문에서는 비상전원공급용 배터리의 적용성을 판단하고, 최적의 배터리 소재와 구동 C-rate를 제시하기 위해 기존의 ESS(Energy Storage System)에 적용되고 있는 NCA, NMC, LFP 세 가지 종류의 18650 원통형 배터리들의 전기적 특성 실험을 진행하였다. 현재 원전에서 요구하는 비상전원공급용 배터리의 백업 타임은 2시간, 4시간, 8시간, 등으로 다양하며 외부자원의 유입 없이 발전소 내에서 보수적으로 최대한 대처 가능한 시간을 72시간으로 제안하고 있다. 따라서 제안되는 백업 타임을 충족시키는 배터리를 선정하기 위해 그림 1과 같은 장비를 사용하여 세 가지의 원통형 셀의 전기적 특성 실험을 통해 요구되는 백업 타임과 보수적으로 대처 가능한 최대시간에 따라 각각 실험한다. 용량 실험을 통해 각각의 요구되는 백업 타임에 맞는 C-rate(1/2C, 1/4C, 1/8C, 1/72C)별 방전용량을 구하고 정격충전을 통해 충전용량을 추출한다. 추출된 방전용량과 충전용량을 활용하여 충전 효율을 계산하고, 비교함으로써 비상전원공급용 배터리로 사용될 배터리의 선정과 그 배터리로 구성된 비상

전원용 배터리의 적절한 구동 C-rate를 제안할 수 있다. 그리하여 최종적으로 부하에 맞는 용량을 계산하고, 비상전원공급용 배터리를 설계할 수 있다. OCV(Open Circuit Voltage) 실험을 바탕으로 모델링에 필요한 파라미터를 추출하여 선정된 배터리의 전기적 등가회로를 모델링하고, 모델을 바탕으로 배터리의 상태를 추정하며 그 과정에서 발생된 문제점을 제시하고 해결방안 및 최적의 배터리와 구동 C-rate를 제안한다.

II. 본론

현재 원전에서는 비상전원공급용 배터리의 백업 타임은 다양하게 적용되고 있다. 본 논문에서는 기존 납축전지를 대신하여 리튬계열 배터리로 사용이 될 경우에 최적의 구동 C-rate를 제안하기 위해 1/2C, 1/4C, 1/8C, 1/72C의 전류를 인가하여 용량 실험을 진행한다. 용량을 산출하기 위해 실험 데이터의 방전구간과 충전구간에서의 용량을 전류적산법으로 계산하며, 추출된 용량을 바탕으로 충전효율을 계산하고 각 C-rate마다 충전효율을 비교하여 최적의 C-rate를 제안할 수 있다. 또한 OCV 실험을 통해 등가회로 모델링에 필요한 파라미터들을 추출하여 모델을 모사한다. 모사된 모델을 바탕으로 수학적 접근을 통해 단자전압을 추정할 수 있다.

1. 실험에 사용된 리튬이온 배터리의 사양

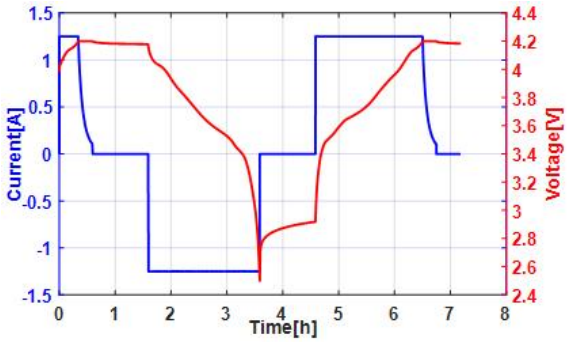
본 논문에서는 세 가지 종류의 배터리로 실험을 진행하며 각 배터리의 구체적인 정보는 표 1과 같이 나타난다.

Table 1. Cell Specification.
표 1. 배터리의 사양

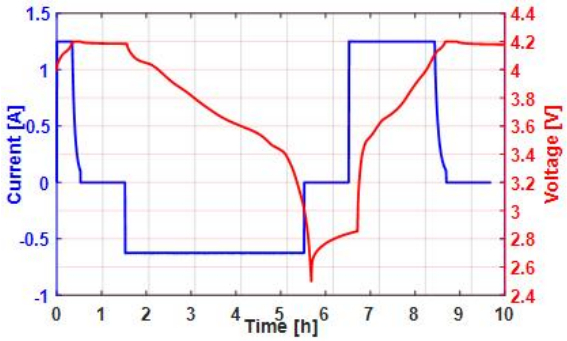
Type	Nominal Capacity	Nominal Voltage	Standard Charge Current	Discharge Cut-off Voltage
NCA	2.5 [Ah]	3.64 [V]	1.25 [Ah]	2.5 [V]
NMC	2.85 [Ah]	3.65 [V]	1.375 [Ah]	2.5 [V]
LFP	1.1 [Ah]	3.3 [V]	0.55 [Ah]	2 [V]

2. 용량 실험 및 충전 효율 분석

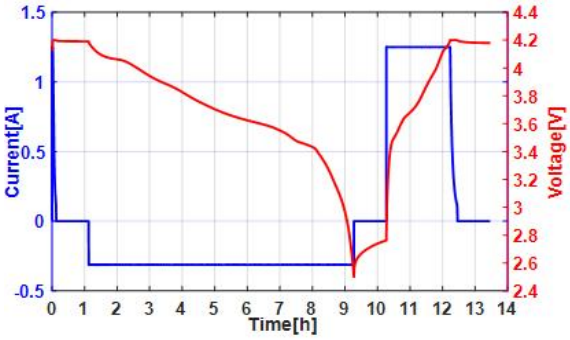
그림 2는 NCA 배터리의 기본 용량실험의 프로파일을 나타내며 NMC, LFP 배터리의 용량실험 또한 그림과 같이 실험이 진행 되었다. 배터리의



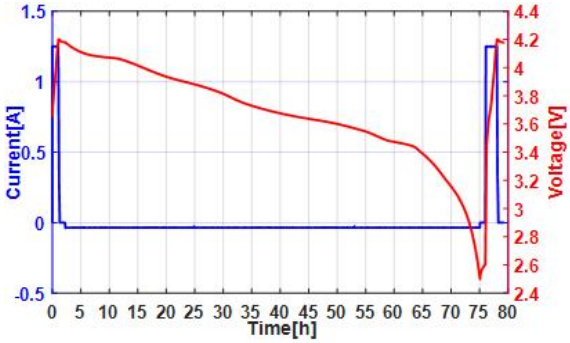
(a) $\frac{1}{2}$C-rate



(b) $\frac{1}{4}$C-rate



(c) $\frac{1}{8}$C-rate



(d) $\frac{1}{72}$C-rate

Fig. 2. Discharging/Charging current profile for capacity measurement (NCA).
그림 2. NCA 배터리의 용량 실험 프로파일

용량실험 조건으로 항온·항습 챔버를 사용하여 외기온도를 상온(25℃)로 유지한 상태에서 실험을 진행했다. 배터리의 용량실험은 다음과 같은 과정으로 진행하였다. 배터리의 전체 방전 용량을 구하기 위해 우선 SOC(State-of-Charge)를 100%로 설정한다. 정격충전전류를 인가하며 정 전압-정 전류 조건(CC-CV, Constant Current-Constant Voltage)으로 완전충전을 하고 한 시간의 휴지시간을 인가한다. 휴지시간을 인가하는 이유는 충전 과정에서 발생하는 열로 인해 상승한 배터리 내부 온도를 안정화시키기 위함이다. 내부 온도 안정화가 끝나면 실험에 맞는 방전 전류로 각각의 배터리의 방전 종지전압까지 완전방전을 진행하면서 그때의 방전용량과 방전시간을 추출한다. 방전 시간은 요구되고 있는 백업타임동안 충분히 비상전원공급용 배터리로서 역할을 할 수 있는지를 보기 위함이다. 방전하는 과정에서 충전할 때와 마찬가지로 열의 발생은 불가피하기 때문에 내부 온도안정화를 위해 휴지시간을 한 시간 인가한다. 충전용량을 추출하기 위해 다시 정격충전전류를 인가하여 정 전압-정 전류 조건으로 완전충전을 진행하는 과정에서 충전용량을 추출한다. 각각의 배터리의 방전구간과 충전구간에서 용량을 추출한 결과는 표 2, 표 3과 같다. 세 가지 종류의 배터리 모두 1/8C에서 충전용량 및 방전용량이 가장 크게 나타났으며 표 4와 같이 LFP 타입을 제외한 NCA, NMC 타입의 배터리는 1/8C에서 요구되는 백업 타임 이상 방전이 가능하다. 외부자원의 유입이 없는 상태에서 요구되는 72시간 이상 방전을 할 수 있는 타입의 배터리는 NCA가 유일하게 나타났다. 또한 기존의 납축전지로 설계된 배터리의 충전효율은 배터리를 방전한 후 다시 충전하는 경우, 방전 전의 상태로 충전이 될 때까지의 충전 량에 대한 방전 량의 비로 나타낼 수 있다. 표 5를 참고하면 충전 효율은 세 가지 배터리 타입 모두 1/8C에서 가장 높게 나타난다. 이에 따라 구동 C-rate는 1/8C로 제안할 수 있으며, 비상상황 대비 방전 시간 및 충전 효율을 고려했을 때, 비상전원공급용 배터리를 설계함에 있어서 NCA 타입의 배터리가 가장 적절하다고 판단된다.

Table 2. Charge Capacity of three cells considering various C-rates.

표 2. 다양한 C-rate 고려 시 배터리의 충전용량 비교

Cell Type	NCA	NMC	LFP
Nominal Capacity	2.50000 [Ah]	2.85000 [Ah]	1.10000 [Ah]
1/2C	2.48842 [Ah]	2.76658 [Ah]	0.93674 [Ah]
1/4C	2.48897 [Ah]	2.79003 [Ah]	0.93643 [Ah]
1/8C	2.53618 [Ah]	2.85709 [Ah]	0.94393 [Ah]
1/72C	2.54657 [Ah]	2.87875 [Ah]	0.94411 [Ah]

Table 3. Discharge Capacity of three cells considering various C-rates.

표 3. 다양한 C-rate 고려 시 배터리의 방전용량 비교

Cell Type	NCA	NMC	LFP
Nominal Capacity	2.50000 [Ah]	2.85000 [Ah]	1.10000 [Ah]
1/2C	2.48688 [Ah]	2.76716 [Ah]	0.93334 [Ah]
1/4C	2.49591 [Ah]	2.79167 [Ah]	0.94117 [Ah]
1/8C	2.54533 [Ah]	2.86195 [Ah]	0.95334 [Ah]
1/72C	2.52459 [Ah]	2.83913 [Ah]	0.92214 [Ah]

Table 4. Discharge time of three cells considering various C-rates.

표 4. 다양한 C-rate 고려 시 배터리의 방전시간 비교

Cell Type	NCA	NMC	LFP
1/2C	1.99 [h]	1.94 [h]	1.7 [h]
1/4C	3.99 [h]	3.92 [h]	3.42 [h]
1/8C	8.14 [h]	8.04 [h]	6.94 [h]
1/72C	72.77 [h]	71.88 [h]	60.7 [h]

Table 5. Charging efficiency of three cells considering various C-rates.

표 5. 다양한 C-rate 고려 시 배터리의 충전효율 비교

Cell Type	NCA	NMC	LFP
1/2C	99.93 [%]	100.02 [%]	99.63 [%]
1/4C	100.27 [%]	100.05 [%]	100.50 [%]
1/8C	100.36 [%]	100.17 [%]	100.99 [%]
1/72C	99.13 [%]	98.62 [%]	97.67 [%]

3. OCV 실험 및 내부 파라미터 추출

2절의 결과 리튬 이온 배터리가 비상 전원 공급용 배터리로서 작동할 경우, 최적의 구동 C-rate는 1/8C로 나타나며, 외부자원의 유입이 없는 상태에서 발전소 내 최대 보수 대처시간으로 요구되는 시간인 72시간의 배터리 모델링에 필요한 파라미터를 추출하기 위해 OCV 실험을 진행했다. 그림 3과 그림 4는 NCA 배터리의 1/8C, 1/72C OCV 실험의 조건으로 완충된 상태에서 방전을 진행하였다. 각 C-rate별로 5%씩 방전이 진행되며 방전이 끝나면

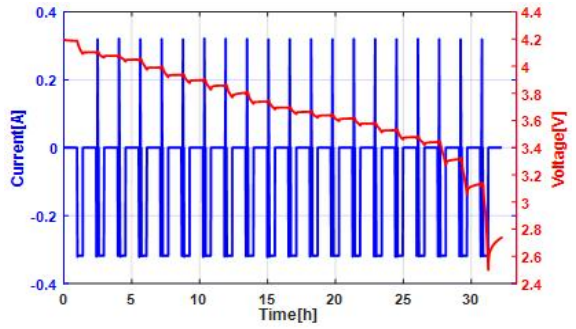


Fig. 3. Discharging/Charging current profile for OCV and Resistance measurement ($\frac{1}{8}$C).

그림 3. OCV 실험 프로파일 ($\frac{1}{8}$C)

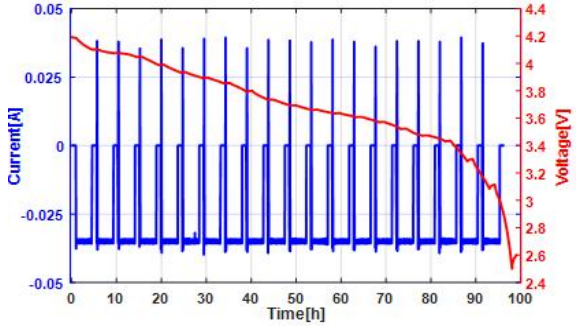


Fig. 4. Discharging/Charging current profile for OCV and Resistance measurement ($\frac{1}{72}$C).

그림 4. OCV 실험 프로파일 ($\frac{1}{72}$C)

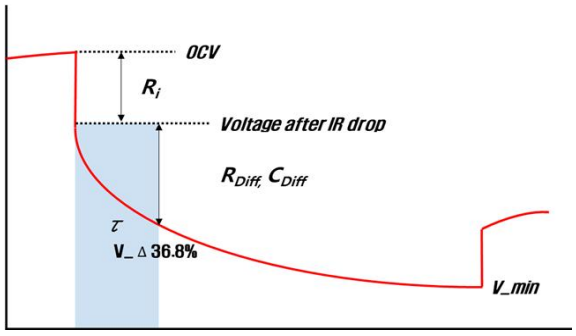


Fig. 5. Region of discharge to extract parameter.

그림 5. 방전 곡선에서의 파라미터 추출

한 시간의 휴지시간을 적용하여 온도를 안정시킨 뒤 각 방전 구간에서 HPPC(Hybrid Pulse Power Characterization)기법을 적용하여 각 구간에서의 저항, OCV, 등 모델링에 필요한 파라미터를 추출한다. HPPC 기법을 적용함으로써 전압 응답곡선에서 방전 및 휴지시 배터리의 전압 응답 시정수를 안정적으로 설정하여 내부 직렬저항 및 분극저항을 도출할 수 있다[4]. OCV실험은 추후 모델링의 검증에도 사용된다. 각 방전 구간에서의 파라미터는 그

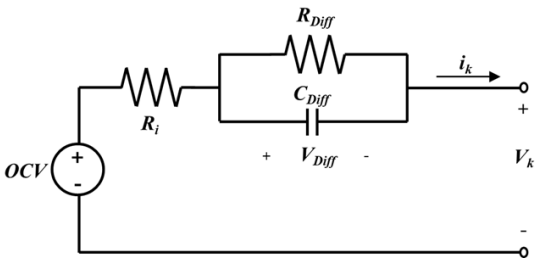


Fig. 6. Equivalent electrical circuit modeling having model parameters ($OCV, R_i, R_{Diff}, C_{Diff}$).

그림 6. NCA 배터리의 EECM 구조

림 5와 같이 추출된다. 휴지 시간이 끝난 즉시의 전압에서 OCV를 추출하며 그 직후 전압 강하에 의한 전압 차이에 전류 값을 나눠주어 모델의 직렬저항을 추출한다. 또 전압 변화량의 36.8% 지점까지 소요된 시간을 시상수로 설정하며, 전압 강하 후 전압과 구간 전압의 최솟값에 전류를 나눠주어 분극 저항의 저항 성분을 구해주며, 시상수에 분극 저항 값을 나눠주어 커패시턴스를 추출할 수 있다. 위의 방식으로 각 SOC별 저항을 추출한 결과는 표 6과 같이 나타난다. 비상상황이 아닌 경우, 배터리의 적정 유지 SOC는 각각의 C-rate에서 DCIR(Direct Current Internal Resistance)값이 가장 낮게 나타나는 SOC 40%가 적절하다고 판단된다.

4. 배터리의 전기적 등가회로 모델링

비상전원공급용 배터리를 설계함에 있어서 배터리의 종류를 선정하는 것만큼 중요하지만 배터리의 전기적 등가회로모델링을 통해 배터리의 현재 상태를 추정하는 것 또한 중요하다. 셀의 충·방전 시 전류 및 전압데이터를 기반으로 내부 파라미터들을 수식에 대입하여 계산할 수 있다. 배터리는 일반적인 전기회로 모델과 다르게 화학적인 요소로 인해 비선형성을 나타낸다. 전기적 등가회로 모델이 배터리의 비선형성을 정확하게 묘사한다고 할 수는 없지만 배터리의 특성을 잘 나타낼 수 있기 때문에 그림 6과 같이 한 개의 직렬저항과 한 개의 RC-ladder로 나타나는 모델이 일반적으로 많이 사용된다[5]. 그림 6에 표현된 파라미터들의 정의는 다음과 같다. OCV는 배터리에 전류를 인가하지 않는 상태에서 측정된 단자전압으로써 충전이나 방전이 끝난 후 최소 30분에서 1시간이 지난 후 측정된 전압이다. 내부 저항(R_i, Internal resistance)은 배터리 양단을 포함하여 배터리 내부에 전하가

Table 6. Internal parameters of equivalent electrical circuit model.

표 6. 등가회로 모델의 내부 파라미터

C-rate	1/8C			
SOC	OCV	R_i	R_{Diff}	C_{Diff}
100%	4.18644			
95%	4.10227	0.01679	0.00806	570.729
90%	4.07663	0.01746	0.00739	582.259
85%	4.04822	0.01745	0.00805	558.804
80%	3.99033	0.01813	0.00873	435.392
75%	3.93585	0.01745	0.00940	457.687
70%	3.89697	0.01747	0.00874	515.151
65%	3.85724	0.01680	0.00941	520.875
60%	3.80340	0.01746	0.01007	476.434
55%	3.73932	0.01814	0.00940	563.639
50%	3.69574	0.01748	0.00739	703.216
45%	3.66369	0.01814	0.00537	837.482
40%	3.63870	0.01612	0.00873	595.543
35%	3.61477	0.01814	0.00538	818.518
30%	3.57845	0.01813	0.00739	649.964
25%	3.52847	0.01812	0.00872	561.669
20%	3.47762	0.01879	0.00805	558.804
15%	3.44173	0.01812	0.01007	437.109
10%	3.31527	0.01949	0.01411	375.597
5%	3.13262	0.02148	0.02417	231.700
0%	2.73912			

C-rate	1/72C			
SOC	OCV	R_i	R_{Diff}	C_{Diff}
100%	4.18579			
95%	4.10163	0.01795	0.01197	376.071
90%	4.07556	0.00615	0.01845	243.964
85%	4.04801	0.03062	0.01225	367.393
80%	3.98947	0.01837	0.01225	367.393
75%	3.93542	0.02450	0.00612	734.786
70%	3.89633	0.03062	0.01225	367.393
65%	3.85596	0.00610	0.02440	184.420
60%	3.79956	0.01211	0.02421	185.866
55%	3.73483	0.01837	0.01225	367.393
50%	3.69381	0.01837	0.01837	244.929
45%	3.66156	0.01852	0.01235	364.500
40%	3.63613	0.01220	0.00610	737.679
35%	3.60879	0.01230	0.01845	243.964
30%	3.57247	0.02450	0.01837	244.929
25%	3.52270	0.01852	0.01852	243.000
20%	3.47442	0.02450	0.01225	367.393
15%	3.43426	0.01830	0.01830	245.893
10%	3.30138	0.02479	0.01859	242.036
5%	3.11296	0.01830	0.03050	147.536
0%	2.60154			

이동할 때의 방해요소로 전극과 전해질에서 발생한다. RC-ladder의 분극 저항(R_{Diff}/C_{Diff}, Diffusion resistance/ capacitance)은 배터리의 등가회로 모델에서 이중층을 구성하는 저항 및 커패시턴스로 농도에 의해 충전이나 방전이 끝난 후에 전압이 떨어지거나 증가하는 현상이다. 단자 전압(V_k, Terminal voltage)은 배터리 단자의 전압 값으로 모델링을 통해 단자 전압을 추정하여 실험 결과와 비교한다[6]. 그림 6의 파라미터들을 포함한 최종적인 배터리 모델 방정식은 식(1), 식(2), 식(3)으로 표현될 수 있다.

$$SOC_k = SOC_0 + \int_0^t \frac{\eta_k i(\tau)}{C_n} d\tau \quad (1)$$

$$i_{R_{Diff,\,K+1}} = \exp\left(\frac{-\triangle t}{R_{Diff}C_{Diff}}\right) i_{Diff} + \left(1 - \exp\left(\frac{-\triangle t}{R_{Diff}C_{Diff}}\right)\right) i_k \quad (2)$$

$$V_k = OCV(SOC_k) - R_{Diff} i_{Diff,k} - R_i i_k \quad (3)$$

C_n = 배터리의 공칭 용량

η = 배터리의 쿨롱 효율

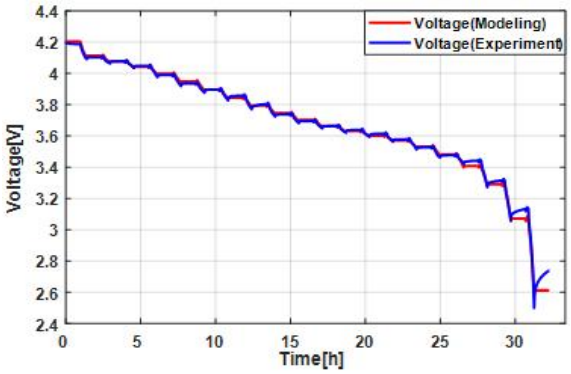


Fig. 7. Discharging voltage Comparison between EECM based voltage and experiments ($\frac{1}{8}$C).

그림 7. 전기적 등가회로 모델링의 비교 결과 ($\frac{1}{8}$C)

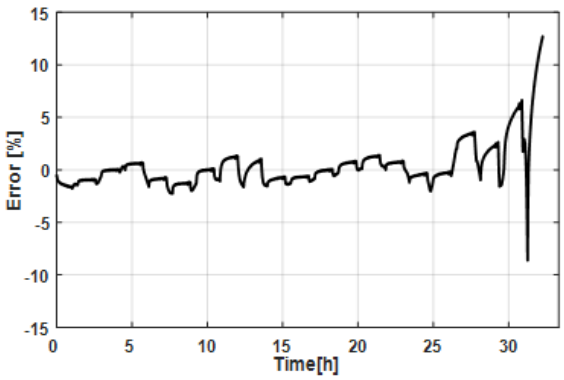


Fig. 8. Modeling error between EECM based voltage and experiments ($\frac{1}{8}$C).

그림 8. 실험 결과와 모델링 결과의 오차 ($\frac{1}{8}$C)

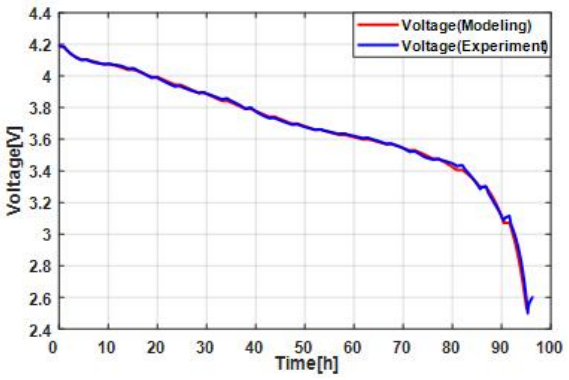


Fig. 9. Discharging voltage Comparison between EECM based voltage and experiments ($\frac{1}{72}$C).

그림 9. 전기적 등가회로 모델링의 비교 결과 ($\frac{1}{72}$C)

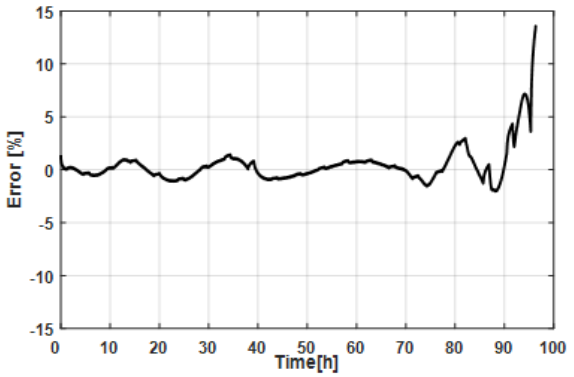


Fig. 10. Modeling error between EECM based voltage and experiments ($\frac{1}{72}$C).

그림 10. 실험 결과와 모델링 결과의 오차 ($\frac{1}{72}$C)

5. 등가회로 모델링 기반 오프라인 추정 결과

4절에서 배터리를 전기적 등가회로 모델링을 진행했으며 모델링의 단자전압 시뮬레이션 결과와 시뮬레이션 오차 그래프는 그림 7, 그림 8, 그림 9, 그림 10과 같이 나타난다. 1/8C, 1/72C의 시뮬레이션 결과 공통적으로 SOC 10% 이상의 구간에서는 대체로 오차범위가 5% 이하로 정확한 결과를 나타내지만, SOC가 10% 이하 구간에서 시뮬레이션 오차가 비교적 크게 나타남을 확인할 수 있다. 그림 8의 결과 1/8 C의 시뮬레이션 평균 오차는 약 0.3402%, 최대 오차는 약 12.7024%이며, 그림 10의 시뮬레이션 평균 오차는 약 0.4157%, 최대 오차는 약 13.5744%로 나타난다. 방전이 완료된 시점에서 휴지기간에 들어갈 때 리튬이온전지에서 리튬의 느린 확산 과정에 의해 전압이 복원되는 현상을 정확한 수식으로 정의하기에는 한계가 있기 때문에 오차가 크게 발생한다.

Ⅲ. 결론

본 논문은 최근 발생한 원전 사고로 인해 원전의 비상전원공급용 배터리가 기존 납축전지를 대신해서 다방면에서 장점이 많은 리튬계열 배터리로의 교체가 고려되는 상황에서 양극 구성 물질이 서로 다른 세 가지 원통형 배터리의 기초적인 전기적 특성 실험 및 분석을 통해 가장 적절한 배터리의 종류를 선정하며 최적의 구동 C-rate를 제안한다. 또한 배터리의 기본 모델링을 통해 배터리의 상태 추정을 하며 성능을 검증하고 문제점을 제시한다. 발전소 내에서 외부자원의 유입 없이 최대한 대처해야하는 72시간 이상 방전이 가능하며, 현재 제안되는 백업 타임을 고려하여 전기적 특성 실험의 결과를 분석했을 때 NCA계열의 배터리가 비상전원공급용 배터리로 사용되기에 가장 적절하다고 판단되며 NCA계열 리튬 배터리의 최적의 구동 C-rate는 충전효율이 가장 좋은 1/8C로 제안한다. 기본 모델링 및 상태추정의 결과로는 SOC 10%이하의 구간에서는 오차가 5% 이상으로 현저하게 크게 나타나는 문제점이 있다. SOC가 낮은 구간에서는 화학적인 특성이 강하게 작용하기 때문에 오차를 개선하기 위해서는 전기화학적 모델링, 피드백 구조로의 재설계 등이 있으며, 이 방법들을 통해 모델링의 정확도를 향상시킬 수 있을 것이다.

References

[1] M. Coleman, C. K. Lee, C. Zhu, and W. G. Hurley, “State-of-Charge Determination From EMF Voltage Estimation: Using Impedance, Terminal Voltage and Current for Lead-Acid and Lithium-ion Batteries,” *IEEE,* Vol.54, No.5, pp.2550-2557, 2007. DOI: 10.1109/TIE.2007.899926

[2] J. Xu, M. Gao, J. Yao, H. Xu, “Design and Study on the State of Charge Estimation for Lithium-ion Battery Pack in Electric Vehicle,” *2009 International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence,* 2009. DOI: 10.1109/AICI.2009.289

[3] Tae-Ho Eom, Min-Ho Shin, Jeong Lee, Jun-Mo Kim, Chung-Yuen Won, “Analysis to battery life time according to charge/discharge temperature

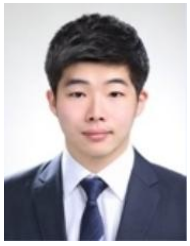
of Li-ion battery,"
[4] Gregory L. Plett, "Battery Management Systems Volume I Battery Modeling," 2015.
[5] Chang Yoon Chun, B.H. Cho, Jonghoon Kim, "Covariance controlled state-of-charge estimator of LiFePO4cells usinga simplified hysteresis model," *Electrochimica Acta,* Vol.265, pp.629-637, 2018. DOI: 10.1016/j.electacta.2018.01.178
[6] US Department of Energy. Battery test manual for plug-in hybrid electric vehicles, revision 2.

BIOGRAPHY

Gunwoo Kim (Member)

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

Seongyun Park (Member)



2016 : BS degree in dept. Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education.
2018~current : MS degree in Electrical Engineering, Chungnam National University.

Jinhyeong Park (Member)

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

Jonghoon 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.

Sungbaek Park (Member)

2007 : BS degree in Electrical Engineering, Korea University.
2019 : MS degree in Electrical Engineering, Chungnam National University.
2008~2011 : Researcher, STX heavy industries.
20011~2013 : Senior Researcher, Daelim.
2013~current : Researcher, Dept. of Nuclear Safety Research, Korea Institute of Nuclear Safety.

Youngmi Kim (Member)

1994 : BS degree in Computer Science and Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology.
1996 : MS degree in Computer Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology.
2012 : Ph.D degree in Computer Engineering, Chungnam National University.
1994~2000 : Development Researcher, Korea Trade Network.
2000~2002 : Research Engineer, Daekook I.N.T.
2002~current : Researcher, Dept. of Nuclear Safety Research, Korea Institute of Nuclear Safety.