



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2024년 2월

석사학위 논문

전압 특성이 다른 리튬 이온
배터리에 대한 증분용량 분석법 기반
용량 추정 연구

조선대학교 대학원

기계공학과

송 희 욱

전압 특성이 다른 리튬 이온
배터리에 대한 증분용량 분석법 기반
용량 추정 연구

Capacity Estimation of Lithium-Ion Batteries with Different
Voltage Characteristics Based on Incremental Capacity
Analysis

2024년 2월 23일

조선대학교 대학원

기계공학과

송 희 욱

전압 특성이 다른 리튬 이온
배터리에 대한 증분용량 분석법 기반
용량 추정 연구

지도교수 이 성 준

이 논문을 공학석사학위 신청 논문으로 제출함

2023년 10월

조선대학교 대학원

기계공학과

송 희 욱

송희욱의 석사학위논문을 인준함

위원장 곽재복 (인)

위원 고광준 (인)

위원 이성준 (인)

2023년 12월

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLES	I
LIST OF FIGURES	II
ABSTRACT	V

제 1장 서 론	1
1.1 연구 배경 및 필요성	1
1.2 연구 목적 및 내용	6

제 2장 증분용량 분석법	7
2.1 증분용량 분석법 개념	7
2.2 증분용량 인자 설계를 위한 배터리 실험	10
2.2.1 실험 배터리 선정 및 실험 프로파일 설계	10
2.2.2 배터리 노화실험 결과	15
2.3 배터리 셀 증분용량 인자 설계	17
2.4 배터리 팩의 증분용량 분석	27
2.4.1 배터리 팩의 증분용량 수식 설계	27
2.4.2 배터리 팩 실험 세트 구성	29
2.4.3 배터리 팩 증분용량 설계식 검증	31

제 3장 배터리 상태변화에 따른 증분용량 추정 성능 분석	35
--	----

3.1 배터리 전기적 등가회로 모델링	35
3.1.1 배터리 셀 모델링	35
3.1.2 배터리 팩 모델링	40
3.2 배터리 상태에 따른 증분용량 추정 성능 분석 결과	43
3.2.1 배터리 셀의 증분용량 추정 성능 분석 결과	43
3.2.2 배터리 팩의 증분용량 추정 성능 분석 결과	45
3.2.3 증분용량을 적용한 실시간 배터리 팩 모의실험 결과	60
 제 4장 결론	 62

LIST OF TABLES

Table 1.1 Capacity estimation methods	3
Table 2.1 Current conditions according to battery type	10
Table 2.2 IFR 26650-3400 Battery specification	11
Table 2.3 INR 18650-29E Battery specification	12
Table 2.4 INR 21700-50S Battery specification	12
Table 2.5 Aging results by battery type	16
Table 2.6 LIB-24-A Module specification	29
Table 2.7 Comparison of various condition	34
Table 3.1 IFR 26650-3400 parameters	37
Table 3.2 INR 18650-29E parameters	37
Table 3.3 INR 21700-50S parameters	38
Table 3.4 Parameters of 1S20P Battery serial module	41
Table 3.5 IC peak results according to battery capacity	56
Table 3.6 Battery module parameter difference and IC peak	58
Table 3.7 Peak estimation error	59

LIST OF FIGURES

Figure 1.1 Global ESS Market Forecast	1
Figure 2.1 Results of internal chemical changes in lithium-ion batteries	7
Figure 2.2 Voltage-IC Curve results according to battery type	8
Figure 2.3 INR 18650-29E Voltage-IC Curve results according to aging cycle	9
Figure 2.4 Charging voltage results according to battery type	11
Figure 2.5 Battery 10cycle charge/discharge experiment results (a) IFR 26650-3400 (b) INR 18650-29E, (c) INR 21700-50S	14
Figure 2.6 Battery experiment set (a) configuration diagram, (b) configuration result	15
Figure 2.7 Capacity aging results according to cycle for each battery type	16
Figure 2.8 Peak point of IC curve for each battery type	18
Figure 2.9 IC peak values and capacity according to battery aging (a) IFR 2660-3400 (b) INR 18650-29E, (c) INR 21700-50S	19
Figure 2.10 Correlation of peak points of IC curve by battery type	20
Figure 2.11 According to ΔV range setting (a) IFR 26650-3400 Voltage-IC graph, (b) INR 18650-29E Voltage-IC graph, (c) INR 21700-50S Voltage-IC graph	22
Figure 2.12 Correlation between point and capacity according to ΔV range	23
Figure 2.13 Voltage-IC Curve Results Under IFR 26650-3400 Battery C-rate Condition	24
Figure 2.14 Voltage-IC Curve Results Under INR 18650-29E Battery C-rate Condition	25
Figure 2.15 Voltage-IC Curve Results Under INR 21700-50S Battery C-rate Condition	26
Figure 2.16 Schematic diagram of voltage measurement for battery pack	30
Figure 2.17 Battery pack experiment set	30
Figure 2.18 CC-CV experimental result of (a) pack voltage, (b) 7-series voltage, (c) pack current	31
Figure 2.19 Results of battery cell voltage and Current	32

Figure 2.20 Voltage - IC curve (a) Battery Pack, (b) 1S20P Battery module,
(c) Battery Cell..... 33

Figure 2.21 Comparison of voltage-IC curve 34

Figure 3.1 Equivalent electrical circuit model of lithium battery..... 36

Figure 3.2 lithium battery simulation model..... 36

Figure 3.3 Simulation modeling verification IFR 26650-3400 (a) experimental and
simulation voltage results, (b) modeling voltage error..... 38

Figure 3.4 Simulation modeling verification IINR 18650-29E (a) experimental and
simulation voltage results, (b) modeling voltage error..... 39

Figure 3.5 Simulation modeling verification INR 21700-50S (a) experimental and
simulation voltage results, (b) modeling voltage error..... 39

Figure 3.6 LIB-24-A battery pack configuration..... 41

Figure 3.7 Simulation modeling verification of 1-serial module in LIB-24-A
battery pack (a) experimental and simulation voltage results,
(b) modeling voltage error..... 42

Figure 3.8 Simulation modeling verification LIB-24-A battery pack (a) experimental
and simulation voltage results, (b) modeling voltage error..... 42

Figure 3.9 Capacity estimation results according to IC peak in IFR 26650-3400..... 43

Figure 3.10 Capacity estimation results according to IC peak in INR 18650-29E..... 44

Figure 3.11 Capacity estimation results according to IC peak in INR 21700-50S..... 44

Figure 3.12 IC curve between module in Fresh condition..... 46

Figure 3.13 Maximum error of IC peak according to aging..... 46

Figure 3.14 Charging experiment results under fresh condition (a) Min/Max module
voltage, (b) Maximum voltage deviation..... 47

Figure 3.15 Charging experiment results under 4% aging condition (a) Min/Max
module voltage, (b) Maximum voltage deviation..... 47

Figure 3.16 Capacity estimation results according to IC peak in Battery pack..... 48

Figure 3.17 Voltage curve according to parameter changes (a) internal resistance
difference, (b) initial SOC difference, (c) capacity difference..... 49

Figure 3.18 7S20P Battery pack simulation model..... 50

Figure 3.19 Simulation results in case of internal resistance difference,

	(a) module voltage, (b) module voltage deviation, (c) load current.....	51
Figure 3.20	Voltage-IC curve according to internal resistance	
	(a) Battery module IC curve, (b) Battery pack IC curve,	
	(c) Battery module vs Battery pack IC curve comparison.....	52
Figure 3.21	Simulation results in case of SOC difference, (a) module voltage,	
	(b) module voltage deviation, (c) load current.....	53
Figure 3.22	Voltage-IC curve according to SOC difference,	
	(a) Battery module IC curve, (b) Battery pack IC curve,	
	(c) Battery module vs Battery pack IC curve comparison.....	54
Figure 3.23	Simulation results in case of capacity difference, (a) module voltage,	
	(b) module voltage deviation, (c) load current.....	55
Figure 3.24	Voltage-IC curve according to capacity difference,	
	(a) Battery module IC curve, (b) Battery pack IC curve,	
	(c) Battery module vs Battery pack IC curve comparison.....	56
Figure 3.25	Simulation results in case of internal resistance/SOC/capacity difference,	
	(a) module voltage, (b) module voltage deviation.....	57
Figure 3.26	Voltage-IC curve according condition.....	58
Figure 3.27	Real-time simulation model for incremental capacity verification.....	60
Figure 3.28	Real-time simulation results, (a) Module average voltage, (b) Max IC	
	peak, (c) Capacity.....	61

ABSTRACT

Capacity Estimation of Lithium-Ion Batteries with Different Voltage Characteristics Based on Incremental Capacity Analysis

Song, Hee wook

Advisor : Prof. Lee, Seong jun, Ph.D.

Department of Mechanical Engineering

Graduate School of Chosun University

As environmental pollution and resource depletion become more serious problems around the world, research on energy storage system in the field of clean energy is also being actively conducted to address these issues. Recently, energy storage systems using lithium-ion batteries are widely used in various applications, such as electric vehicles (EVs), ESS (Energy Storage System), E-mobility, and electric-powered ships, because they have a higher energy density than energy storage devices using other types of batteries. To predict the lifespan and operate efficiently in various applications, it is necessary to accurately estimate the capacity of the battery system. Among the various battery capacity estimation methods, the incremental capacity analysis method is a method of estimating capacity based on the characteristics of the three changes in internal materials, LAM (Loss of Active Material), LLI (Loss of Lithium Inventory), and CL (Conductivity Loss) during battery aging.

In this paper, we apply the incremental capacity analysis method, which is a capacity estimation method that quantifies the capacity change trend according to changes in internal materials, to estimate the capacity of various lithium-ion batteries with different voltage characteristics. To do this, we design the factors necessary for incremental capacity analysis and estimate the capacity by applying the designed factors. In this case, the factors necessary for incremental capacity analysis can be divided into three categories: characteristic points that are closely related to capacity, the range of voltage increases (ΔV), and current conditions. Through correlation analysis of each factor, we propose the most

efficient factor for each battery type. The proposed factors were applied to batteries with different voltage characteristics, and the capacity estimation results using the incremental capacity analysis method were compared with the capacity errors in the actual batteries. The estimation accuracy was verified at the capacity error level of RMSE 0.3%. The design formula for estimating the capacity by expanding the battery cell to a battery pack was verified. However, the design formula can only be used in conditions where the imbalance between the modules inside the battery pack is insufficient when it is expanded to a battery pack. Therefore, a battery pack simulation model was designed and the accuracy of the model was verified. The verified battery pack model was simulated in an unbalanced condition and the characteristics according to the unbalanced condition were analyzed to suggest the possibility of expansion to a battery pack

제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 필요성

전 세계적으로 환경오염 및 자원고갈에 대한 문제가 증가함에 따라 이를 해결하기 위해 친환경 에너지 분야의 에너지 저장장치에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 에너지 저장장치는 리튬이온, 납축, 니켈전지등 이차전지를 다직렬, 다병렬 연결한 형태로 구성하고 에너지를 저장할 수 있는 시스템이다. 그중 리튬이온 배터리를 적용한 에너지 저장장치는 상대적으로 다른 이차전지를 적용한 에너지 저장장치 대비 저장 가능한 에너지 밀도가 높은 장점이 있다. Fig 1.1은 글로벌 ESS(Energy Storage System) 시장 및 리튬이온 배터리 시장 전망으로 에너지 저장장치에 대한 수요가 점점 증가되고 있고, 그에따라 에너지 저장장치에 적용되는 리튬이온 전지에 대한 비중도 증가되고 있다[1]. 에너지 저장장치는 대표적으로 전기자동차(Electric Vehicle, EV), ESS(Energy Storage System), E-mobility, 전기추진 선박 등 여러 크고작은 응용분야에서 사용되고 있다. 앞선 응용분야에서 배터리관리시스템(Battery Management System, BMS)으로 배터리 상태를 필수적으로 진단하는데 이때 배터리의 에너지 충전상태 및 수명을 예측하기 위해서 배터리의 용량을 정확하게 알아내는 것이 요구된다.

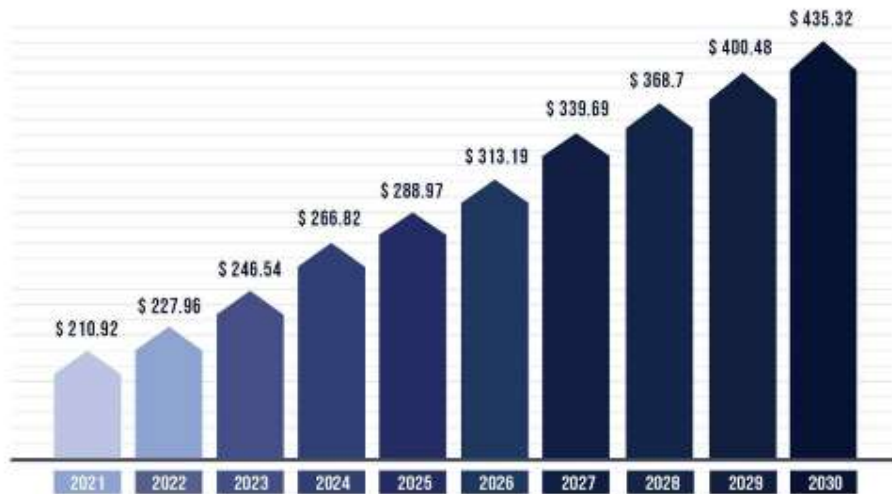


Figure 1.1 Global ESS Market Forecast[1]

용량을 추정하기 위한 여러가지 방법들이 존재한다. 그중 파라미터 분석 방법은 배터리 내부 물질 변화로 나타나는 출력특성을 분석하여 용량을 추정하는 방법으로 세부적 방법은 증분용량 분석법(IC, Incremental Capacity), 차동전압 분석법(DV, Differential Voltage), 차동온도 분석법(DT, Differential Temperature), EIS(Electrochemical Impedance Spectroscopy) 분석법으로 나타낼 수 있다[3~8]. 이러한 방법의 장점은 다른 용량추정 방법들보다 용량추정의 복잡성이 낮은 반면 용량추정 정확도는 높은 장점이 있지만 노이즈에 민감하여 노이즈가 생기는 경우 용량추정 정확도가 낮아지고 용량추정을 하기 위해서는 특정 전압 지점에서 충전을 해야하는 단점이 있다. 또한 파라미터 분석 방법으로 용량추정시 2% 이내의 추정 정확도 갖는다. SOC 기반의 추정 방법은 확장칼만필터(EKF), Sigma Point Kalman Filter(SPKF), Particle Filter(PE) 추정 방법으로 분류 가능하다[9~11]. SOC 기반의 방법은 배터리 ECM(Battery Equivalent Circuit Model) 모델의 수식으로 배터리 용량을 추정하고 배터리의 측정 전압, 전류, 온도로 부터 모델 상태에 대한 오차가 있는 경우 반복적으로 추정값을 갱신하여 용량 오차를 수정하는 방법으로 SOC와 용량을 동시에 추정할 수 있다[9~11]. SOC 기반의 추정 방법은 실시간 용량 추정, 노이즈에 효과적, 비선형 시스템에 적용 가능한 장점이 있지만 다른 방법들 대비 용량추정의 복잡성이 높고 배터리의 수학적 모델에 의존하기 때문에 배터리 모델링 파라미터의 정확도가 높아야 한다는 단점이 있다. 이러한 용량추정 방법으로 용량추정시 1% 이내의 추정 정확도를 갖는다. 데이터 기반 추정 방법은 데이터 기반 모델을 설계하고 수집된 데이터로 모델을 학습시켜 용량을 추정하는 방법으로 세부적 방법은 NN(Neural Network), SVM(Support Vector Machine), Deep learning 방법으로 분류 가능하다[12~14]. 데이터 기반 방법은 배터리의 수학적 모델링이 필요없고, 높은 적응력, 강력한 근사 능력, 비선형 시스템에 적용 가능한 장점이 있지만 정확도 측면에서 많은 데이터가 필요하고 주로 오프라인에서 트레이닝을 시켜야 한다는 단점이 있다. 또한 데이터 기반 용량추정 방법으로 용량추정시 1.5% 이내의 추정 정확도를 갖는다. 이러한 용량 추정 방법의 장단점을 Table 1.1에 나타낸다[2].

Table 1.1 Capacity estimation methods[2]

Methods		Advantages	Disadvantages	Estimation Error
Parameter Analysis-based method	Incremental Capacity (IC) [3~7]	Reflect the chemical characteristics of the battery, Simple model structure	Noise sensitivity	2%
	Differential Voltage (DV) [8]			
	Differential Temperature (DT) [9]			
	EIS [10]			
SOC-based method	Extended Kalman Filter (EKF) [11,12]	Closed-loop error management, Real-time dynamic tracking, Effective to handle the noise, Non-linear systems applicable	Complex model and parameter building process, High dependency on models	1%
	Sigma Point Kalman Filter (SPKF) [13]			
	Particle Filter (PF) [14]			
Data-driven method	Neural Network (NN) [15,16]	No need to focus on internal mechanisms, simple model building, high adaptive capability, Powerful approximating ability, Non-linear systems applicable	High level of data dependency, offline training needed, Large computation effort, Over-fitting	1.5%
	Support Vector Machine (SVM) [17,18]			
	Bayesian learning method			
	The existing data-drive [19]			

본 논문에서는 앞서 설명한 다양한 용량추정 방법중 용량추정 복잡성이 낮지만 추정 정확도는 상대적으로 다른 용량추정 방법 만큼 정확성이 있는 파라미터 분석 방법(Parameter Analysis-based method)의 증분용량 분석법(IC, Incremental Capacity))에 대한 용량추정 모델 설계 연구를 진행한다. 증분용량 분석법은 기존에 많은 연구가 진행되고 있는 방법이다. Jiang의 연구에서는 리튬인산철(LFP, Lithium Iron Phosphate) 배터리에서의 IC 피크 면적 분석을 통해 노화 메커니즘을 연구하고 서로 다른 부하 프로파일에서 작동되는 배터리간 유사성과 차이점을 검출 및 추정용량 오차가 작은 방법인 ridge 회귀방법을 선정하여 추정용량 오차를 3% 이내로 도출했다[20]. 해당 연구는 한가지 배터리 타입에 대해서만 증분용량 분석법으로 용량추정 및 검증을 진행하였지만 타입이 다른 여러 가지 배터리들에서도 검증할 필요가 있다. 또한 Han의 연구에서는 각각 다른 상용 리튬티탄산(LTO, Lithium Titanium Oxide) 배터리 노화 예측을 위해 증분용량 분석법을 사용했다[21]. 하지만 해당 연구에서는 증분용량 분석법을 적용하기 위한 인자인 전압증가량(ΔV) 범위와 전류조건 설계 근거가 제시되지 않았다. Li의 연구에서는 배터리 열화 메커니즘을 감지하고 정량화 할수 있는 증분용량 분석법을 적용하여 SOH를 추정한다. IC curve 도출시 노이즈를 줄이기 위해 가우시안 필터를 기반으로 간단하고 강력한 스무딩으로 노화와 관련된 시그니처를 정확히 판별하여 용량추정 시간을 빠르게 줄여줄 수 있었다[22]. 이 연구에서는 NMC(LiNiMnCo) 리튬이온 배터리 기반으로 증분용량 분석 인자인 전류조건을 설계 및 샘플링 시간에 대한 설계를 진행하고 근거를 제시했다. 하지만 전압증가량(ΔV) 범위 대한 설계 근거는 제시되지 않았고, NMC(LiNiMnCo) 계열의 리튬이온 배터리에 대해서만 검증했기 때문에 다른 타입의 배터리에 대한 검증도 필요로 한다. 더 나아가 모듈 또는 시스템 단위에 대한 증분용량 연구도 필요로 한다. C.she의 연구에서는 셀 레벨의 증분용량 실험으로 상위 모델인 배터리 팩 레벨로 확장하는 연구를 수행했다. 배터리 셀에 대한 IC를 도출하고 셀의 직병렬 개수를 반영하여 수식을 설계한 뒤 배터리 팩 레벨에 대한 SOH를 예측했다[23]. 하지만 이 방법은 배터리 팩 내부의 셀 간 불균형이 없는 조건에서만 사용 가능한 방법이고 내부 셀 간 불균형이 거의 없는 배터리 팩으로 검증이 진행되었다.

앞서 언급한바와 같이 대부분의 연구들에서는 1가지 종류의 배터리들로만 증분용량 분석을 진행하는 연구였다. 또한 증분용량 설계 인자인 배터리 용량과 관계가 나타나는 특이점, 전압증가량(ΔV) 범위, 전류조건을 선정한 근거가 명확히 명시되어있지 않거나 1가지 배터리 종류에 대해서만 설계조건을 선정했다. 따라서 본 논

문에서는 전압특성이 다른 다양한 리튬이온배터리에 대한 증분용량 인자 조건인 특이점, 전압증가량(ΔV) 범위, 전류조건을 설계 및 셀 레벨에서만 진행되었던 연구를 팩 레벨로의 확장 가능성을 제시한다.

1.2 연구목적 및 내용

배터리 용량추정을 진행하기 위한 증분용량 분석법의 체계적 설계 방법을 제시한다. 증분용량 분석법(IC, Incremental Capacity)으로 용량추정을 진행하기 위해서는 용량과 관계가 나타나는 특이점 선정, 배터리의 충전전류 크기, 고정된 전압증가량(ΔV) 등의 인자 설계가 필요로 한다. 본 논문에서는 전압특성이 다른 다양한 리튬이온배터리에 대한 실험 및 상관관계 분석을 통해 증분용량 인자를 설계한다. 설계된 증분용량 인자를 적용하여 각 배터리에 대한 용량추정을 통해 정확성을 검증을 통해 증분용량 인자에 대한 설계 방법을 제시했다. 제시한 증분용량 설계 인자를 전압 특성이 다른 배터리들에 적용하고 용량을 추정된 결과 용량오차 RMSE 0.3%로 추정 정확도를 검증했다. 또한 셀 레벨에서만 진행되었던 연구를 팩 레벨로 확장하기 위해 배터리 팩 시뮬레이션 모델을 이용하여 배터리 셀 간 불균형이 발생하는 조건등이 변경되었을때 영향성을 분석했다. 또한 증분용량 분석법을 적용한 배터리 팩에서 실시간 용량추정 동작성 및 정확도 검증을 위해 Matlab Simulink/Simscapex 기반으로 검증을 진행했다. 그 결과 실제 용량 대비 0.75%의 용량 오차가 나타나 실시간 증분용량 알고리즘을 검증했다.

제 2 장 증분용량 분석법

2.1 증분용량 분석법의 개념

배터리를 충방전 진행에 따라 내부 화학물질이 변화하고 이에 따라 배터리의 용량도 변화되게 된다. Fig 2.1은 리튬이온배터리에서 앞선 노화에 따른 화학적 변화를 나타낸 것으로 내부 화학물질 변화로는 일반적으로 전도성 상실(CL, Conductivity Loss), 활물질 감소(LAM, Loss of Active Material), 리튬저장소 감소(LLI, Loss of Lithium Inventory)의 3가지 속성으로 분류 가능하다[24-25]. 전도성 상실(CL, Conductivity Loss)은 내부 집전체(Current Collector) 부식 또는 바인더의 분해와 같은 배터리 내부 부품에 대한 열화와 관련이 있다[25,27]. 활물질 감소(LAM, Loss of Active Material)는 전해질 분해 또는 흑연의 박리 등 활성 물질의 구조적 변화와 관련이 있다[25]. 리튬저장소 감소(LLI, Loss of Lithium Inventory)는 고체막 형성(SEI, Solid Electrolyte Interphase)으로 인해 입자 균열 및 기공이 막힘으로 나타난다[26].

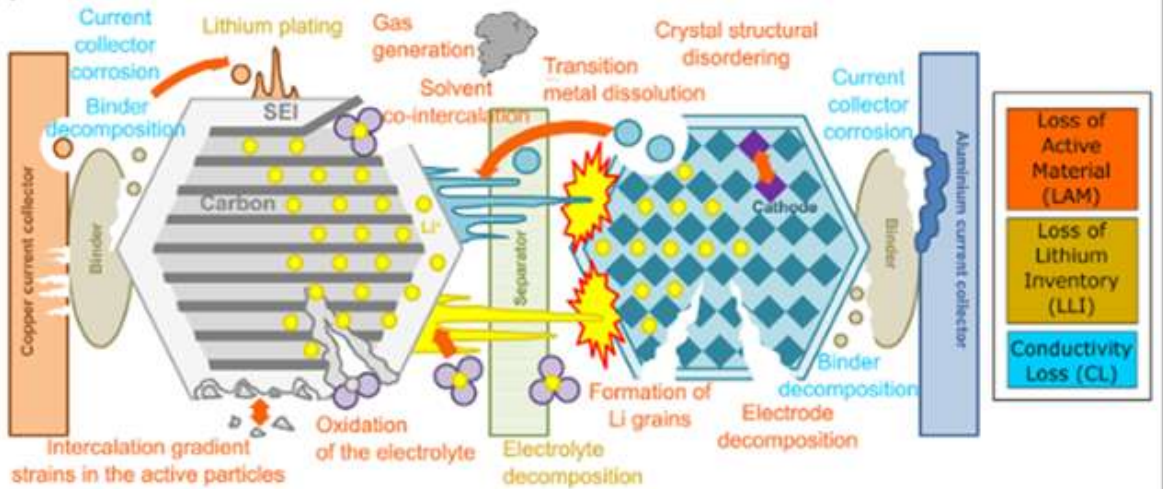


Figure 2.1 Results of internal chemical changes in lithium-ion batteries[20]

이러한 배터리 화학적 특성을 정량적인 방법으로 용량과 연계시키는 방법으로 증분용량 분석법(IC, Incremental Capacity), 차동전압 분석법(DV, Differential Voltage),

EIS(Electrochemical Impedance Spectroscopy) 측정방법 등이 존재한다. 그중 증분용량 분석법에서 사용되는 증분용량은 식 (1)과 같이 배터리의 일정한 전압증가량(ΔV) 변화에 대한 그때의 미소용량(ΔQ)으로 나타낸다.

$$IC = \frac{\Delta Q}{\Delta V} \quad (1)$$

위의 수식을 통해 배터리 사용 전압범위에 대한 IC curve를 도출하고 노화에 대한 IC값의 변화 추이를 분석한다. Fig. 2.2는 INR 21700-50S 배터리와 INR 18650-29E 배터리의 운용전압 조건에 따른 IC curve를 나타낸 결과로 배터리의 전압 특성에 따라 IC Curve의 전체적인 형태가 결정된다. Fig. 2.3은 INR 18650-29E 배터리 노화에 따른 IC Curve를 나타낸 결과이다. Fig. 2.3은 배터리 노화에 따른 IC Curve를 나타낸 결과로 배터리 노화에 따라 피크값의 높이가 감소되는 형태 나타나는 것을 확인 가능하다. 증분용량 분석법은 배터리 노화에 따른 IC 피크값과 그때의 용량값에 대한 상관관계를 통해 용량을 추정한다.

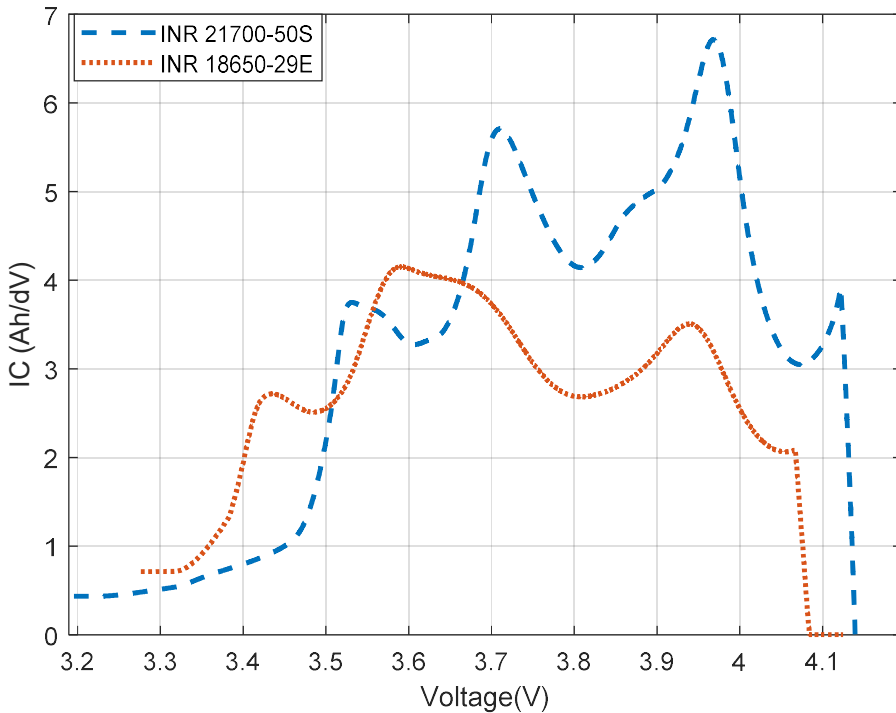


Figure 2.2 Voltage-IC Curve results according to battery type

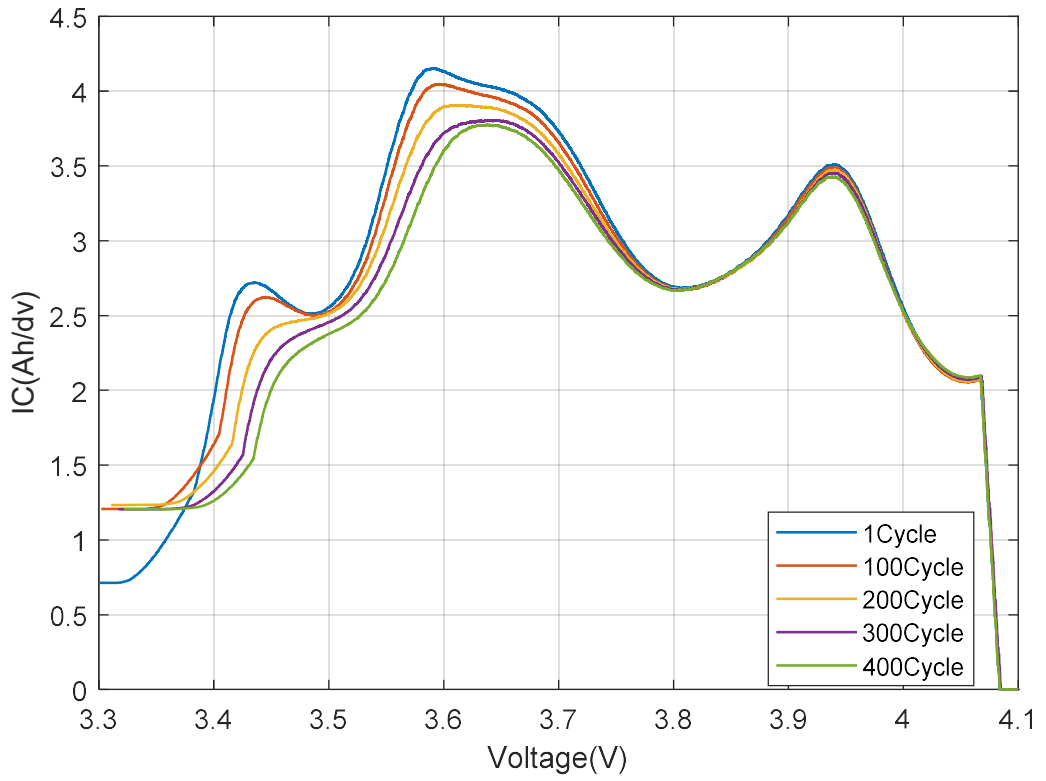


Figure 2.3 INR 18650-29E Voltage-IC Curve results according to aging cycle

2.2 증분용량 인자 설계를 위한 배터리 실험

2.2.1 실험 배터리 선정 및 실험 프로파일 설계

본 절에서는 증분용량 인자 설계를 위해 배터리 실험을 진행할 배터리 사양을 선정한다. 전압 특성이 다른 배터리를 선정하기 위해 INR 21700-50S, INR 18650-29E, INR 21700-50E, IFR 26650-3400, INR 18650-30Q, INR 18650-35E, INR 18650-25R, INR 21700-48G, INR 21700-48X 총 9개의 배터리를 0.5C-rate 조건으로 Table 2.1의 전류/전압 조건으로 충전 실험을 진행하고, 충전 결과를 통해 전압 특성이 다른 배터리를 선정한다. Fig 2.4는 9개의 배터리의 충전전압을 나타낸 결과로 원활한 비교를 하기 위해 초기 충전 시작점을 동일한 지점으로 이동시켰다. 배터리 전압 특성을 비교한 결과 대부분의 배터리 전압특성은 유사하게 도출되었지만 파선으로 나타낸 IFR 26650-3400 배터리와 점선으로 나타낸 INR 18650-29E 배터리의 전압특성은 다르게 도출되었다. LFP 계열의 IFR 26650-3400 배터리는 중간영역에서는 전압이 천천히 증가되지만 만충, 만방지점에서 급격히 전압이 증가되는 특성을 나타낸다. INR 18650-29E 배터리는 다른 배터리들 대비 초기 충전시 순간적인 전압상승량이 다른 배터리들 대비 낮게 나타났고 만방에서 만충지점 까지 선형적으로 전압이 증가되는 특성이 나타나고 있다. 본 연구에서는 다양한 배터리 충전실험을 통해 전압특성이 다른 IFR 26650-3400, INR 18650-29E, INR 21700-50S 3가지 배터리를 연구 대상으로 선정한다.

Table 2.1 Current/Voltage conditions according to battery type

배터리 명	INR 21700-50S	INR 21700-50E	IFR 26650-3400	INR 18650-30Q	INR 18650-29E
조건	2.5A	2.5A	1.7A	1.5A	1.25A
	2.5V~4.2V	2.5V~4.2V	2V~3.65V	2.5V~4.2V	2.5V~4.125V
배터리 명	INR 18650-35E	INR 18650-25R	INR 21700-48G	INR 21700-48X	
조건	1.75A	1.25A	2.5A	2.5A	
	2.65V~4.2V	2.5V~4.2V	2.5V~4.2V	2.5V~4.2V	

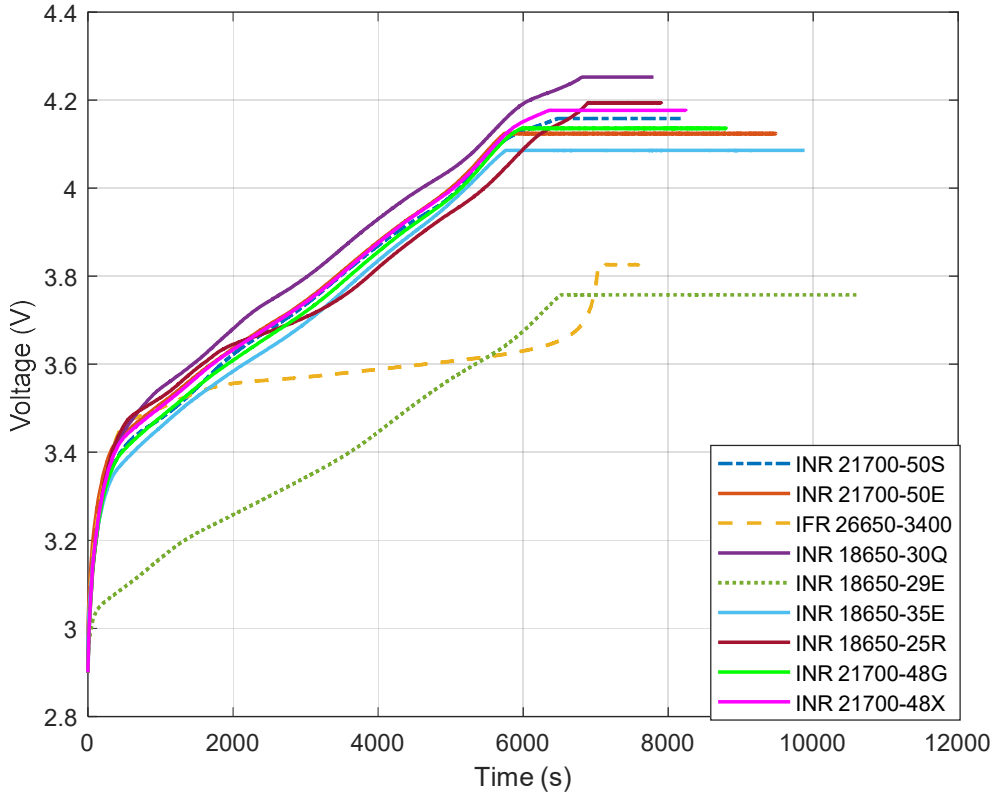


Figure 2.4 Charging voltage results according to battery type

선정된 배터리들의 노화 실험을 진행하기 위한 프로파일 설계 및 실험을 통해 도출된 배터리 결과를 분석한다. 실험 프로파일 설계에 앞서 선정된 배터리들의 사양을 Table 2.2~2.4로 정리한다. Table 2.2는 IFR 26650-3400 배터리의 사양을 정리한 내용으로 사용가능 전압 범위는 2.0V ~ 3.65V 조건, 최대 충전 1C-rate, 방전 3C-rate 조건으로 충방전시 배터리의 수명이 2000 사이클 이상으로 수명이 긴 장점이 있다. Table 2.3은 INR 18650-29E 배터리의 사양을 정리한 내용으로 사용가능 전압 범위는 2.5V ~ 4.125V 조건, 최대 충전 1C-rate, 방전 1C-rate 조건으로 충전시 배터리의 수명이 1000사이클 이상으로 배터리 수명이 긴 장점이 있다. Table 2.4는 INR 21700-50S 배터리의 사양을 정리한 내용으로 사용가능 전압 범위는 2.5V ~ 4.2V 조건, 최대 충전 2C-rate, 방전 9C-rate 조건으로 충방전시 High C-rate로 사용할 수 있는 장점이 있다. Table 2.2~2.4와 같이 각 배터리에 대한 사양을 정리하고 배터리에 맞는 노화 실험 프로파일을 설계한다. 배터리 노화 실험은 배터리를 단순 충방전

반복을 진행하여 배터리를 노화시키는 실험으로 배터리 노화를 진행하기 위해 0.5 C-rate 충방전 조건으로 만충방전 10회를 진행하는 프로파일을 설계한 뒤 프로파일을 반복 진행한다. 앞서 설계한 프로파일로 실험된 결과는 Fig 2.5와 같다. Fig 2.5 (a)는 IFR 26650-3400 배터리를 10회 충방전한 결과, Fig 2.5 (b)는 INR 18650-29E 배터리를 10회 충방전한 결과, Fig 2.5 (c)는 INR 21700-50S 배터리를 10회 충방전한 결과이다.

Table 2.2 IFR 26650-3400 Battery specification

Specification	
IFR 26650-3400	
Chemistry	LFP
Dimension(mm)	Diameter : 26mm Height : 65mm
Nominal Voltage	3.2V
Nominal Capacity	3400mAh
Charge Voltage	3.65V
Discharge Voltage	2.0V
Standard Current	Charge : 0.5C Cut-off current : 150mA Discharge : 0.5C
Max. Continuous Current	Charge : 1C Discharge : 3C
Cycles	≥ 2000 Cycle



Table 2.3 INR 18650-29E Battery specification

Specification	
INR 18650-29E	
Dimension(mm)	Diameter : 18.33 ±0.07 Height : 64.87 ±0.13
Nominal Voltage	3.7V
Nominal Capacity	2500mAh
Charge Voltage	4.125V
Discharge Voltage	2.5V
Standard Current	Charge : 0.33C Cut-off current : 62.5mA Discharge : 1C
Max. Continuous Current	Charge : 1C Discharge : 1C
Cycles	≥ 1000 Cycle





Table 2.4 INR 21700-50S Battery specification

Specification	
INR 21700-50S	
Dimension(mm)	Diameter : Max 21.25mm Height : Max 70.62mm
Nominal Voltage	3.6V
Nominal Capacity	5000mAh
Charge Voltage	4.2V Experimet voltage : 4.15V
Discharge Voltage	2.5V Experimet voltage : 3.15V
Standard Current	Charge : 0.5C, Cut-off current : 250mA Discharge : 2C
Max. Continuous Current	Charge : 2C Discharge : 9C
Cycles	≥ 250 Cycle



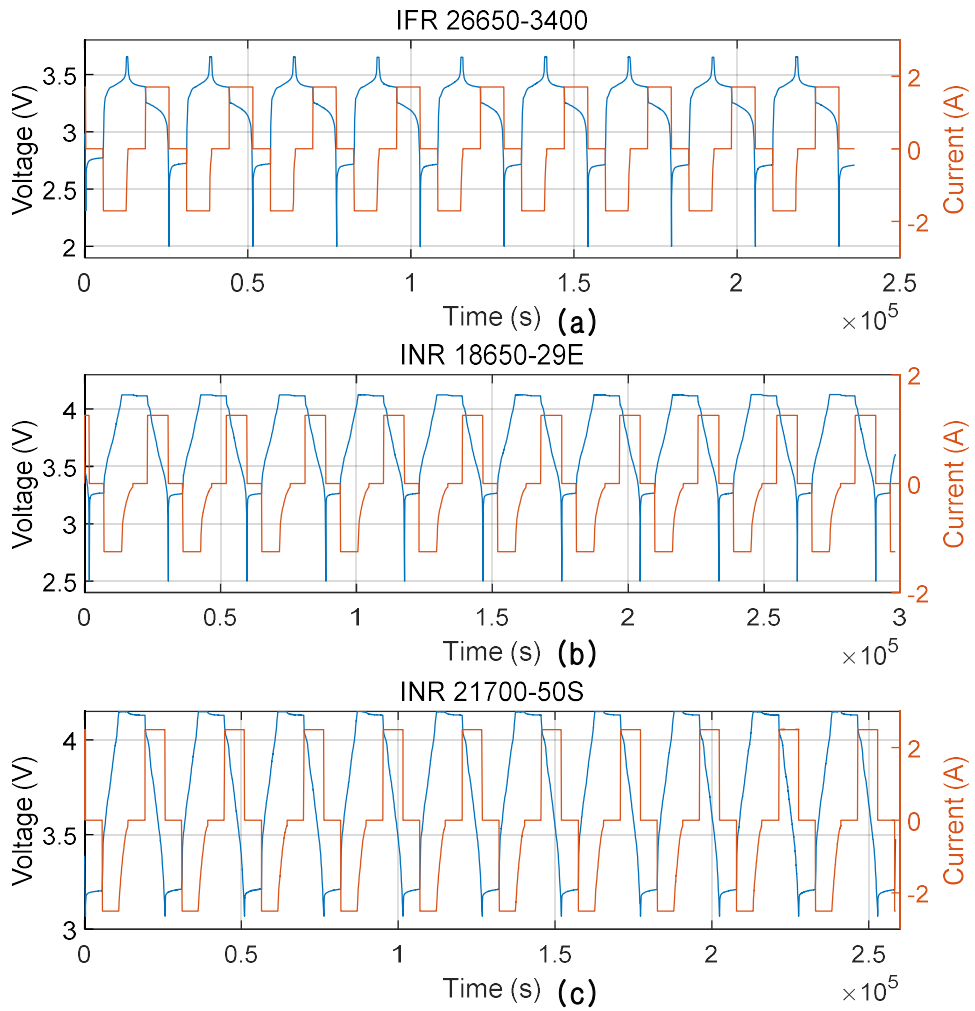


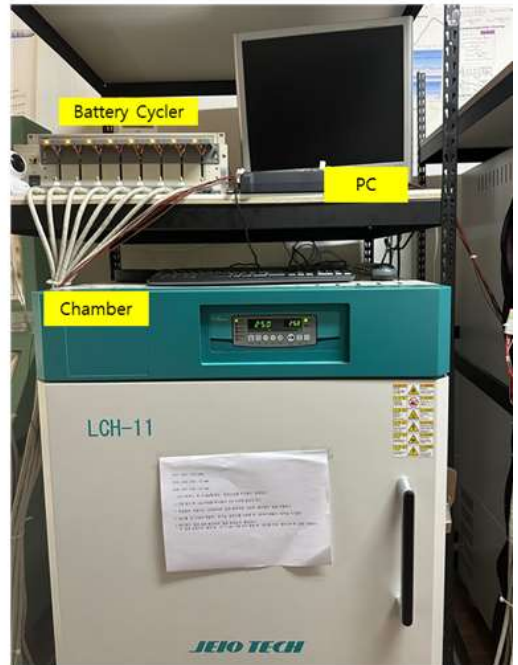
Figure 2.5 Battery 10cycle charge/discharge experiment results (a) IFR 26650-3400, (b) INR 18650-29E, (c) INR 21700-50S

2.2.2 배터리 노화 실험 결과

본 절에서는 앞서 선정된 배터리들의 노화실험을 진행하기 위해 실험세트를 구성하고 실험을 통해 도출된 결과를 분석한다. Fig 2.6 (a)는 배터리 실험세트 구성도를 나타낸다. 실험세트는 PC, 배터리 충방전기, 온도 챔버, 배터리로 구성되고 Fig 2.6(b)와 같이 실제 구축되었다. 이때 배터리 충방전기는 5V12A급의 NEWARWE BTS4000 배터리 충방전기를 사용하고, 배터리 실험시 온도를 일정하게 유지하기 위해 JEIO TECH의 LCH-11 항온 챔버를 사용하여 상온 25°C 조건을 유지 시킨다.



(a)



(b)

Figure 2.6 Battery experiment set (a) configuration diagram, (b) configuration result

Table 2.5는 선정된 배터리의 실험된 충방전 누적 횟수, 초기용량, 노화용량, 노화율을 정리한 표이다. IFR 26650-3400 배터리는 총 70 사이클 충방전 실험을 진행했고 초기용량 3.4238 Ah 대비 0.62% 노화 되었다. 향후에는 IFR 2660-3400 배터

리는 노화 실험을 진행하여 데이터를 확보할 예정이다. INR 18650-29E 배터리는 총 470 사이클 충방전 실험을 진행했고 초기용량 2.655 Ah 대비 9.744% 노화 되었다. INR 21700-50S 배터리는 총 350 사이클 충방전 실험을 진행했고 초기용량 4.4096 Ah 대비 10.66% 노화 되었다. 각 배터리의 용량이 노화된 결과를 Fig 2.7의 사이클에 따른 용량으로 나타낸다. 배터리의 충방전 사이클에 따른 노화정도를 분석 시 INR 21700-50S 배터리가 노화가 빠르게 진행되었고 그다음 INR 18650-29E, IFR 26650-3400 순으로 노화되는 속도를 확인할 수 있다. 각 배터리별 노화실험 결과를 가지고 증분용량 분석법을 적용한 용량추정 연구를 진행한다.

Table 2.5 Aging results by battery type

배터리 타입	충방전 횟수	초기용량	노화용량	노화율
IFR 26650-3400	70 Cycle	3.4238 Ah	3.4025 Ah	0.6200 %
INR 18650-29E	470 Cycle	2.6550 Ah	2.3963 Ah	9.7440 %
INR 21700-50S	350 Cycle	4.4096 Ah	3.9396 Ah	10.660 %

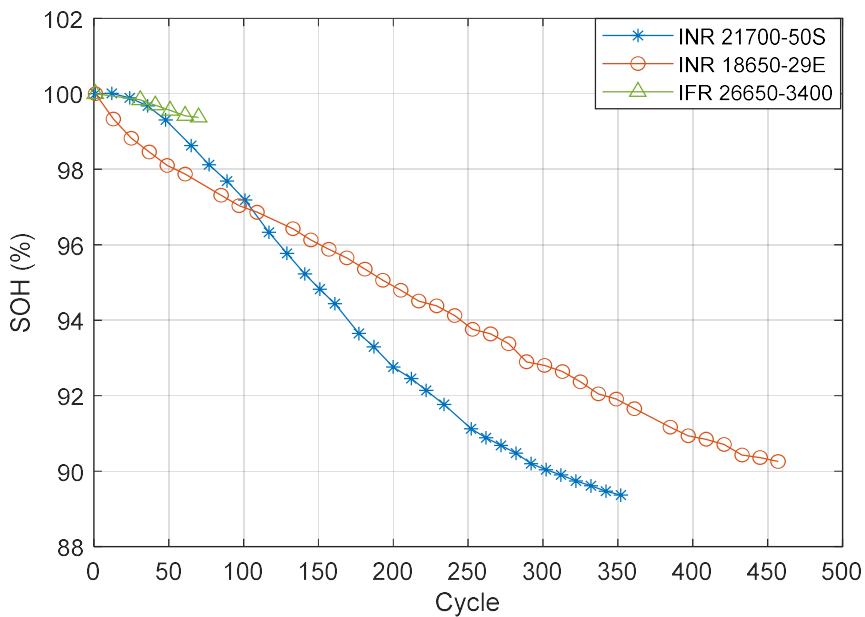


Figure 2.7 Capacity aging results according to cycle for each battery type

2.3 배터리 셀 증분용량 인자 설계

본 절에서는 용량추정을 하기 위한 증분용량 분석을 위한 인자를 설계한다. 증분용량 분석을 위해 필수적인 설계조건으로는 특이점(피크값) 선정, 배터리 전압증가량(ΔV) 범위 선정, 충전전류의 크기 선정이 필요로 한다.

Fig 2.8은 전압 특성이 다른 배터리의 IC curve를 나타낸 결과로 배터리 전압 특성에 따라 여러개의 피크점들을 확인할 수 있다. 그림에서 볼수 있듯이 피크점들은 배터리 노화에 따른 내부물질 변화로 인해 나타나는데, 이점들은 용량과의 상관관계가 나타나기 때문에 각 피크값과 용량과의 상관관계를 분석한다. 일반적으로 두 변수간 연관성을 측정하기 위한 지표로는 Pearson, Spearman, Kendall 상관 분석 방법이 있다. 그 중 Pearson 상관 분석은 두 변수 변화 경향에 대한 선형적 관계를 나타내지만, Spearman, Kendall 상관 분석은 두 변수 변화 경향에 대한 상관 관계를 나타내기 때문에 선형적 관계가 아니더라도 상관관계를 나타낸다[28]. 이러한 상관 분석을 하기 위한 여러 방법중 선형적 상관 관계를 나타내는 Pearson 상관 분석 방법을 적용하여 용량과의 상관관계가 높은 특이점을 선정한다[29]. Pearson 상관 분석은 두 변수 X와 Y 간의 선형 상관관계를 계량화 하는 방법으로 두 변수 X와 Y의 공분산을 각각의 표준편차의 곱으로 나눈형태의 식 (2)로 나타낼 수 있고, 그 결과는 +1과 -1 사이의 값으로 표현된다. Pearson 계수가 +1이면 완벽한 양의 선형 상관 관계를 의미하고, 0이면 선형 상관 관계가 없음을, -1은 완벽한 음의 선형 상관 관계를 나타낸다.

$$r_{xy} = \frac{\sum_i^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_i^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_i^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2)$$

Fig 2.9는 배터리 노화에 따른 IC 피크값과 배터리 용량을 나타낸 것으로 각 배터리의 IC 피크값과 용량을 변수 선정하고 식 (2)에 적용하여 Pearson 상관분석을 진행하고 가장 상관성이 높은 피크점을 선정한다. 그 결과 Fig 2.10과 같이 각 배터리에서의 피크점 마다에서의 상관성을 나타낸다. IFR 26650-3400 배터리는 두 개의 피크점이 도출되는데 Peak #1은 0.8587, Peak #2는 0.9290 상관관계가 나타났고 용량과의 상관성이 가장 높은 Peak #2를 특이점으로 선정한다. INR 18650-29E 배터리

의 경우 3개의 피크점이 도출되는데 Peak #1은 0.9511, Peak #2는 0.9919, Peak #3은 0.9355의 상관관계가 나타났고 용량과의 상관성이 가장 높은 Peak #2를 특이점으로 선정한다. INR 21700-50S 배터리의 경우 3개의 피크점이 도출되는데 Peak #1은 0.9879, Peak #2는 0.9945, Peak #3은 0.6846의 상관관계가 나타났고 용량과의 상관성이 가장 높은 Peak #2를 특이점으로 선정한다. 선정된 각 배터리들은 두 번째 피크점이 용량과의 상관성이 가장 크게 도출이 되는 것을 확인할 수 있다.

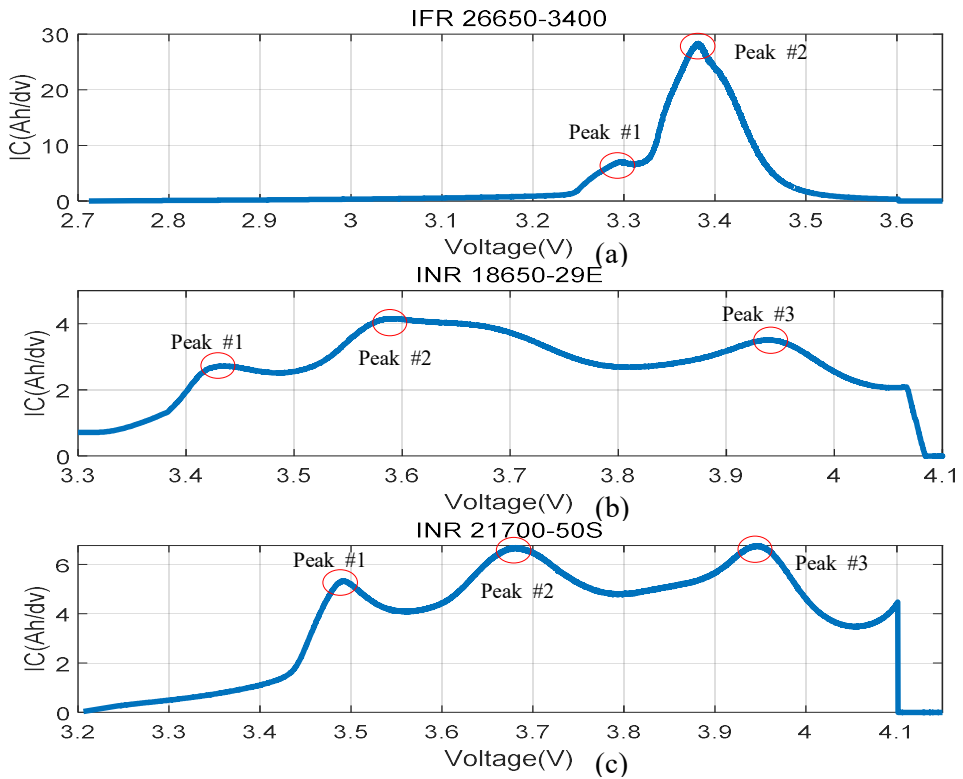


Figure 2.8 Peak point of IC curve for each battery type

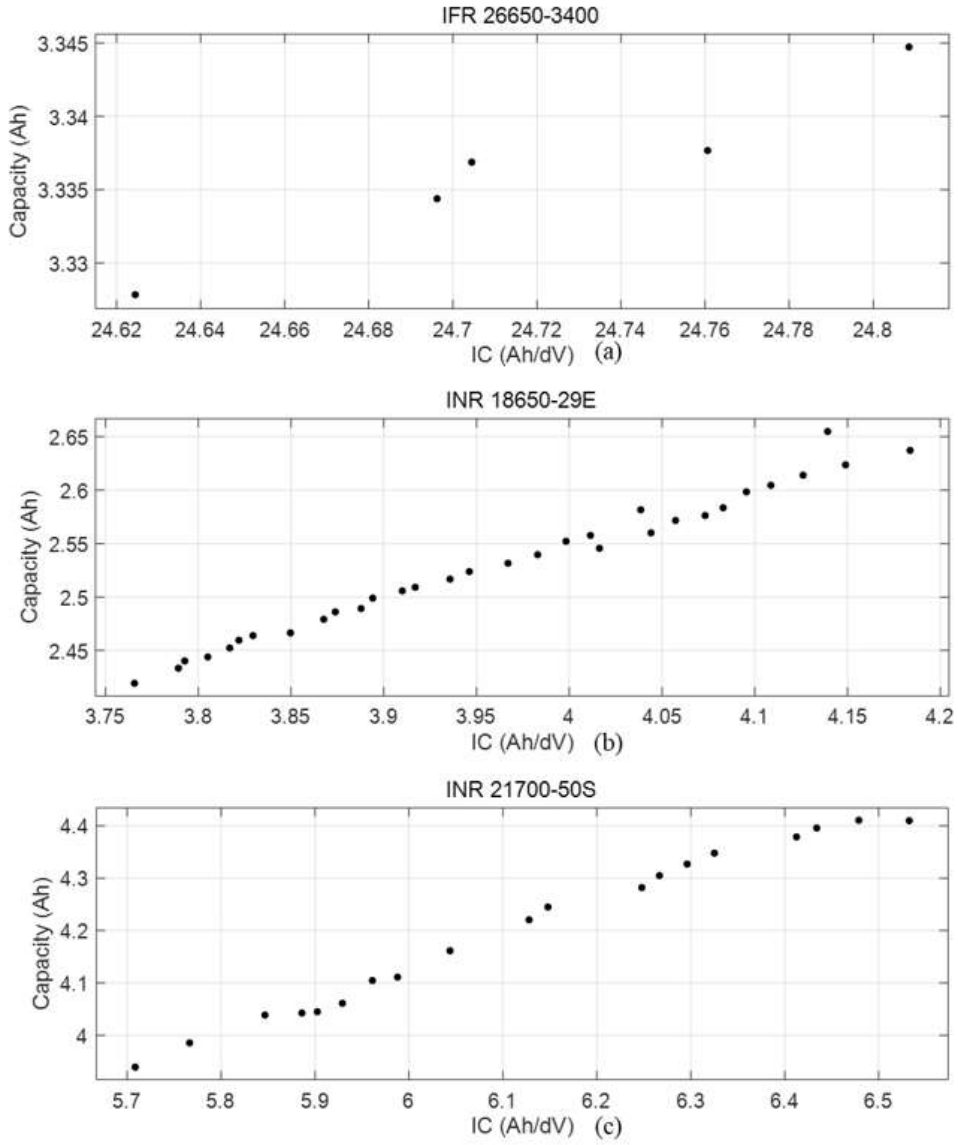


Figure 2.9 IC peak values and capacity according to battery aging (a) IFR 2660-3400, (b) INR 18650-29E, (c) INR 21700-50S

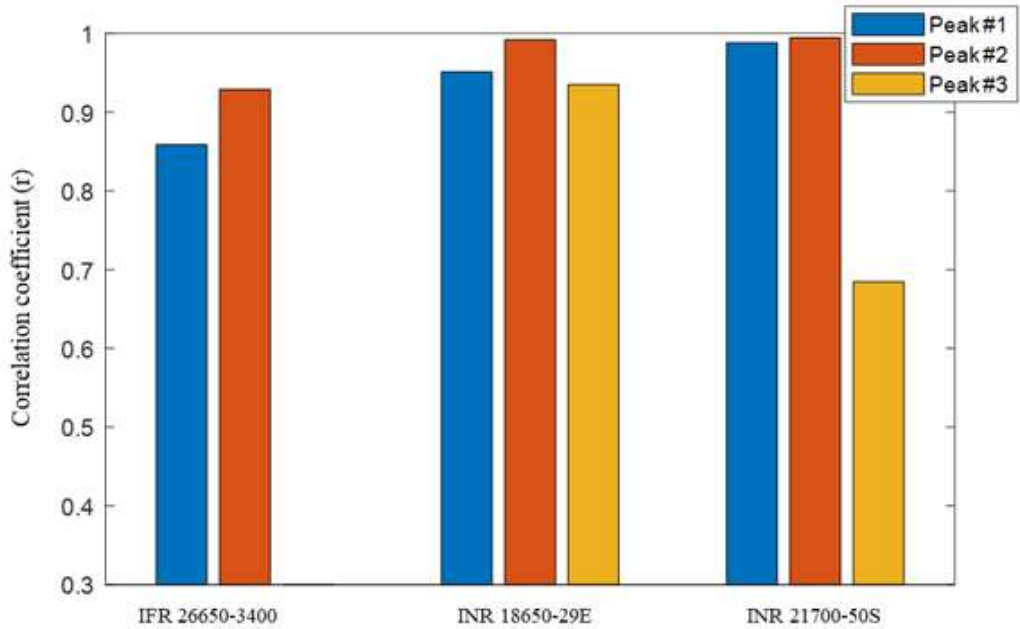


Figure 2.10 Correlation of peak points of IC curve by battery type

배터리의 전압증가량(ΔV) 범위를 설계하기 위해 앞서 0.5C-rate로 충방전 실험된 IFR 26650-3400, INR 18650-29E, INR 21700-50S 배터리들 결과를 통해 전압증가량(ΔV) 범위를 설계한다. 전압증가량(ΔV) 범위는 10mV, 20mV, 50mV, 70mV, 100mV로 설정하고 IC curve를 나타내어 비교한다. Fig 2.11은 배터리 타입에 따라 전압증가량(ΔV) 범위를 다르게 설정하여 Voltage-IC curve를 나타낸 결과이다. 배터리 타입이 다르더라도 전압증가량 범위가 증가됨에 따라 피크지점이 낮아지는 형태로 나타나고 100mV 이상으로 전압증가량 범위 설정시 배터리 타입에 따른 고유의 IC curve의 형태가 사라지게 되어 최대 100mV까지의 전압증가량 범위로 비교한다. Fig 2.11 (a)는 충전시 중간영역에서의 전압변화가 크지 않은 평평한 형태의 전압특성을 갖는 IFR 26650-3400 배터리의 경우로서 충전시 선형적으로 전압변화가 나타나는 INR 18650-29E의 Fig 2.11 (b), INR 21700-50S의 Fig 2.11 (c) 대비 전압증가량 범위가 증가됨에 따라 피크값이 크게 감소되는 것을 확인할 수 있다. 전압변화량 범위에 따른 IC curve의 결과를 통해 그림에서와 같이 피크값의 변화를 확인하였고, 그때의 용량과의 상관성을 나타내어 용량과의 상관관계가 높은 전압변화량의 범위를 선정한다. Fig 2.12는 전압변화량 범위에 따라 도출된 피크점과 용량으로 상관성을

나타낸 결과이다. Fig 2.12 (a)는 IFR 26650-3400 배터리에 대한 결과, Fig 2.12 (b)는 INR 18650-29E 배터리에 대한 결과, Fig 2.12 (c)는 INR 21700-50S 배터리에 대한 결과를 나타냈다. Fig 2.12 (a)의 경우 전압증가량 범위가 10mV, 20mV 수준시 용량과의 상관관계가 0.1348, 0.5305 수준으로 낮게 도출되었고 70mV 조건에서 가장 상관관계가 높은 0.9699 수준으로 도출된다. Fig 2.12 (b)의 경우 전압증가량 범위가 증가될수록 상관관계가 점점커지는 형태로 나타난다. 100mV 조건에서 상관관계는 0.9931로 가장 크게 도출되었지만, 50mV 이상인 경우부터는 상관관계가 0.001~0.002 수준의 차이로 50mV ~ 100mV 조건의 전압증가량 범위에서는 차이가 없는 것으로 판단된다. Fig 2.12 (c)는 Fig 2.12 (b)와 반대로 전압증가량 범위가 10mV, 20mV 조건에서 상관관계가 0.9935, 0.9939로 가장 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 방법을 통해 각각의 배터리마다 상관관계가 높은 전압증가량 범위를 선정할 수 있다.

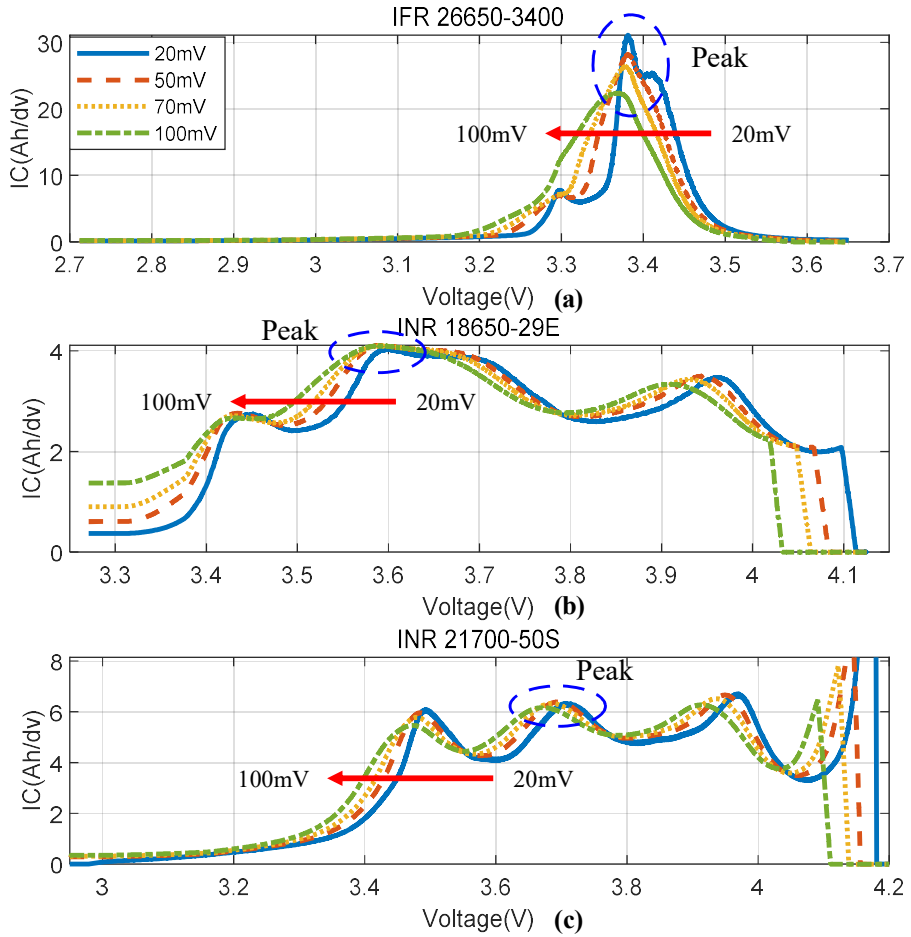


Figure 2.11 According to ΔV range setting (a) IFR 26650-3400 Voltage-IC graph, (b) INR 18650-29E Voltage-IC graph, (c) INR 21700-50S Voltage-IC graph

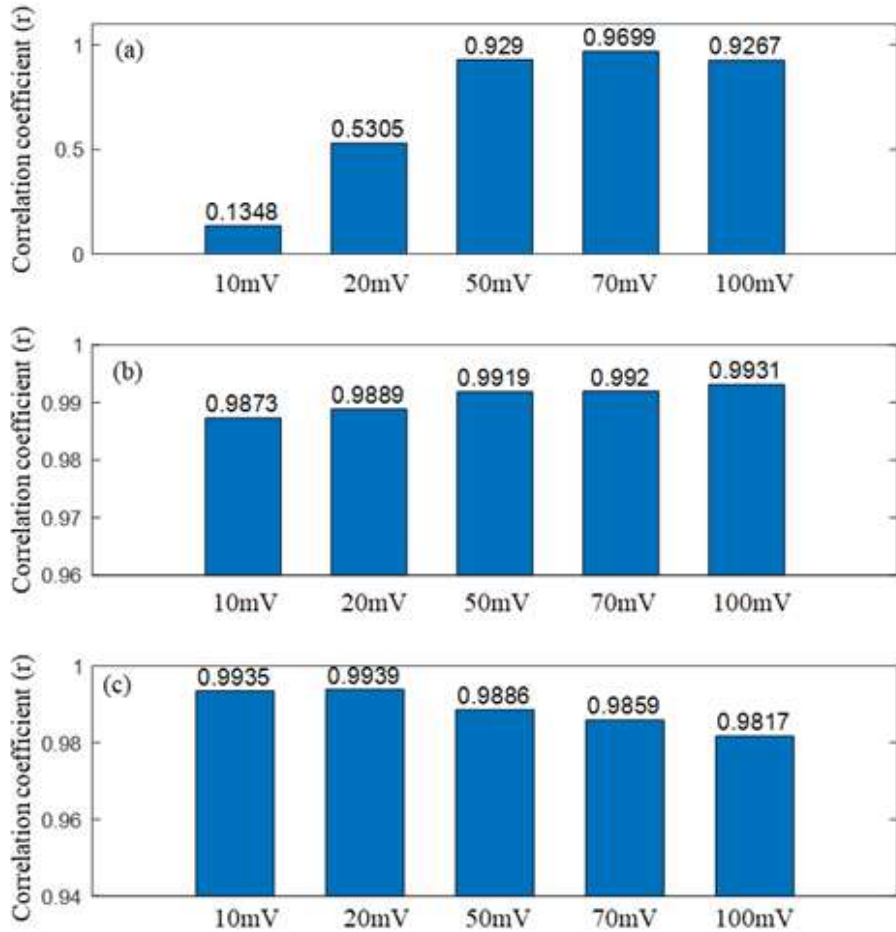


Figure 2.12 Correlation between point and capacity according to ΔV range

배터리의 충전전류 조건 설계에 대한 기존 연구들에서는 0.04C-rate의 낮은 충전조건으로 설정하여 증분용량을 도출하였다[22]. 하지만 0.04C 충전조건으로 배터리 실험시 충전시간이 오래걸리는 단점이 있고 실제 배터리시스템에서는 배터리 타입, 용량, 직병렬 개수등 다양한 형태로 제작되기 때문에 다양한 충전 C-rate 조건으로 사용된다. 배터리 별 C-rate 조건에 따른 실험을 통한 IC curve의 형태를 비교하여 충전전류 조건 선정 방법을 제시한다. 배터리의 C-rate 크기는 실제 배터리 시스템에서 사용되는 크기인 0.1C, 0.5C, 1C 조건을 선정하고 기존 연구들에서 제시된 0.04C 조건을 추가한 총 4가지 C-rate 조건에서의 배터리 충방전 실험을 진행한다. 이때 INR 21700-50S 배터리는 최대 2C-rate 조건으로 충전이 가능하여 INR 2

1700-50S 배터리는 2C-rate 조건의 충방전 실험을 추가적으로 진행한다. 이때 각 배터리들의 전압증가량 범위는 50mV로 선정한다. Fig 2.13은 C-rate 조건에 따른 IFR 26650-3400 배터리의 IC curve를 나타낸 결과로 0.04C 조건, 0.1C 조건, 0.5C 조건, 1C 조건에서의 IC curve를 나타낸다. IFR 26650-3400 배터리는 IC curve에서 2개의 특이점이 검출되는데 1C-rate 조건에서는 A 특이점 부분이 명확하게 검출되지 않는 것을 확인할 수 있다. Fig 2.14는 C-rate 조건에 따른 INR 18650-29E 배터리의 IC curve를 나타낸 결과로 IC curve에서 3개의 특이점이 나타나는 특징을 가지고 있지만 1C-rate 조건에서는 C 특이점이 검출되지 않는 것을 확인할 수 있다. Fig 2.15는 C-rate 조건에 따른 INR 21700-50S 배터리의 IC curve를 나타낸 결과로 IC curve에서 4개의 특이점이 나타나는 특징을 가지고 있지만 1C-rate 조건에서는 D 특이점이 나타나지 않고 2C-rate 조건으로 갈수록 특이점이 검출되지 않는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 충전 C-rate가 다른 운용조건에서 특이점이 다르게 나타나기 때문에 증분용량 알고리즘 설계시 각 배터리에 맞는 전류 조건에서 용량추정 모델이 설계 되어야 함을 알 수 있다.

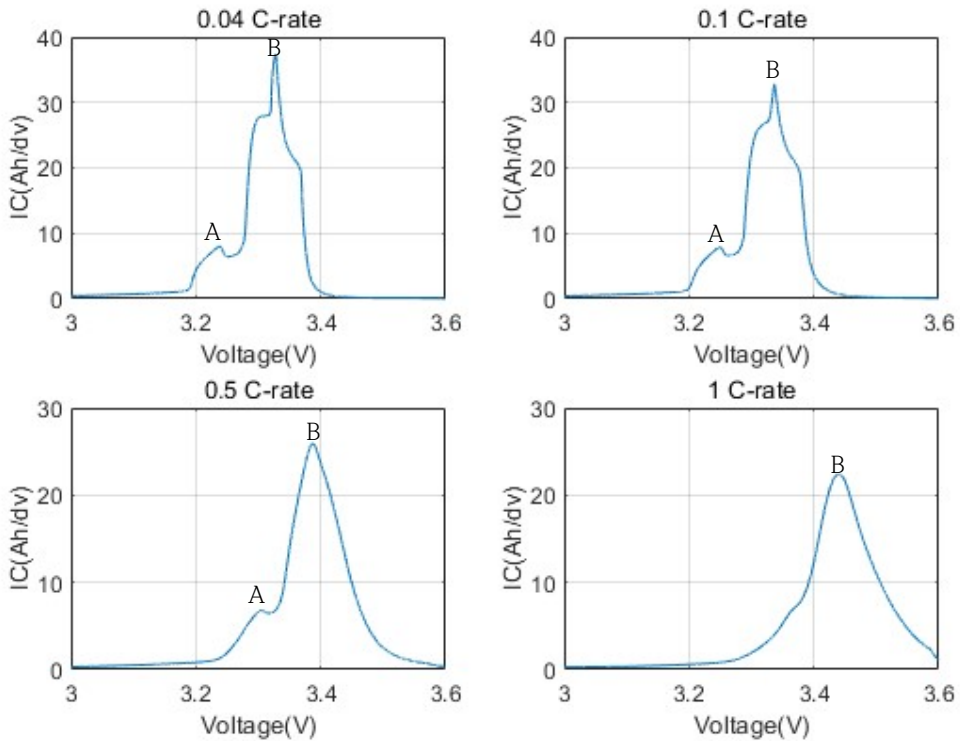


Figure 2.13 Voltage-IC Curve Results Under IFR 26650-3400 Battery C-rate Condition

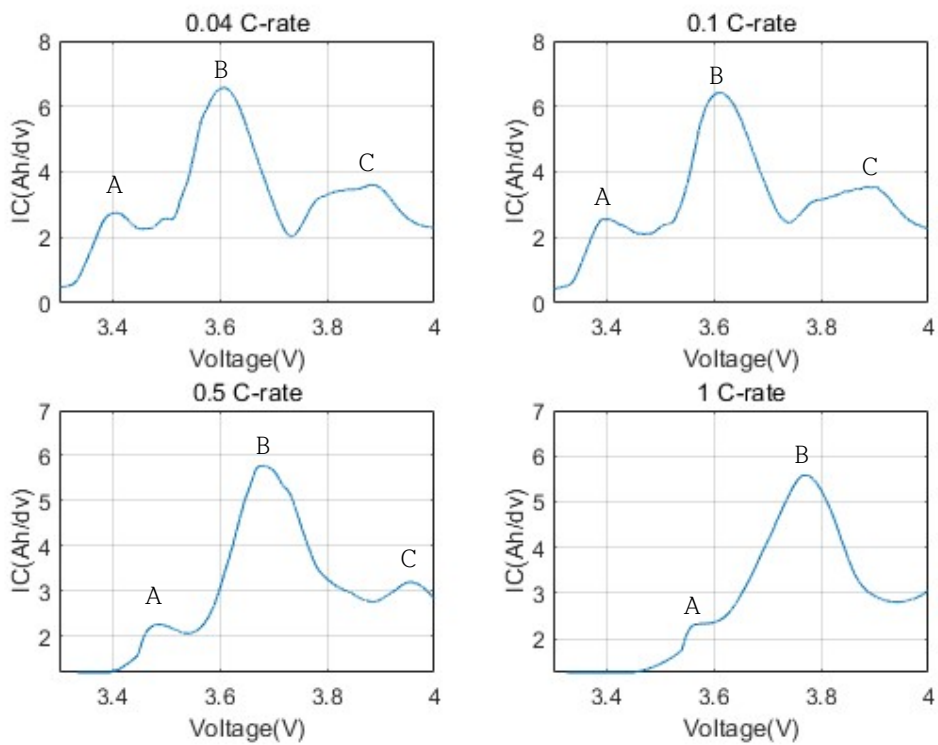


Figure 2.14 Voltage-IC Curve Results Under INR 18650-29E Battery C-rate Condition

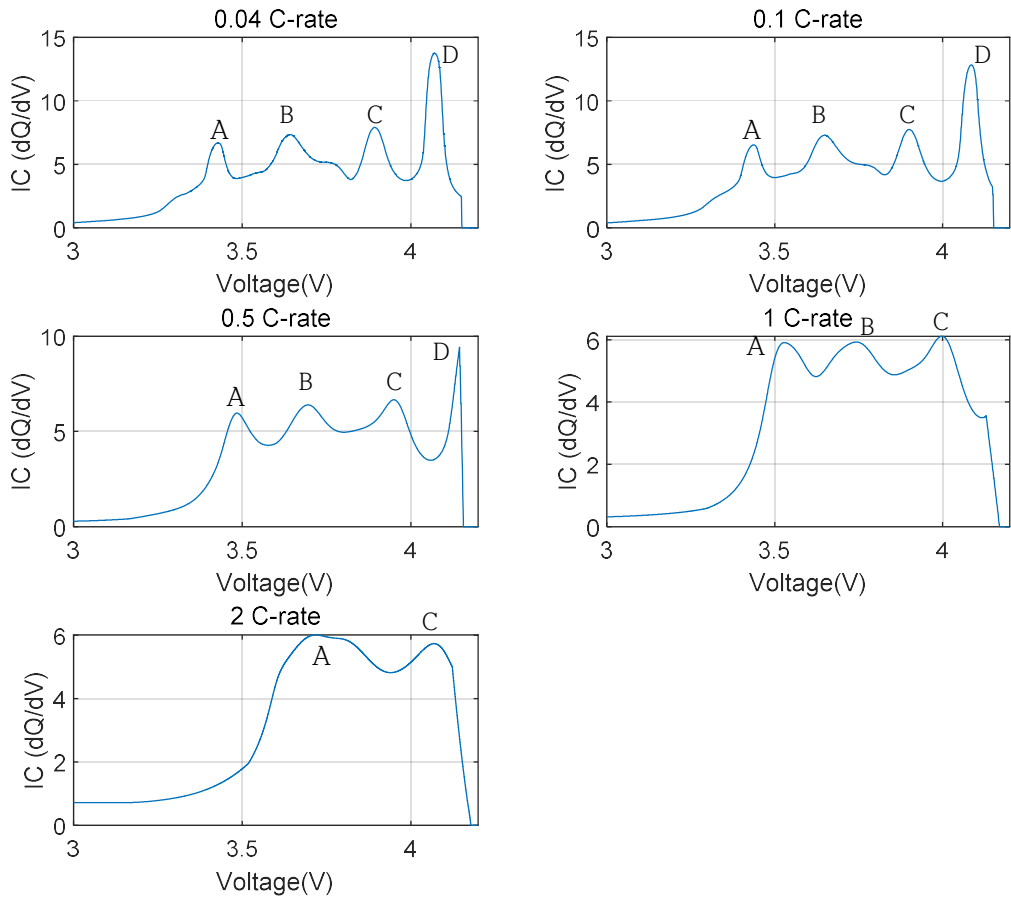


Figure 2.15 Voltage-IC Curve Results Under INR 21700-50S Battery C-rate Condition

2.4 배터리 팩의 증분용량 분석

2.4.1 배터리 팩의 증분용량 수식 설계

증분용량 기반 용량추정 알고리즘을 설계하기 위해서는 배터리에 대한 실험이 요구된다. 하지만 EV 및 ESS 등 산업계에서 사용되는 배터리시스템은 다직렬 다병렬 연결된 시스템으로 고전압, 고전류를 사용하기 때문에 이러한 배터리시스템을 실험하기 위해서는 고전압, 고전류용 충방전기 및 화재 예방을 위한 방폭챔버등이 필수적으로 있어야 실험을 진행할 수 있는 단점을 가지고 있다. 이러한 실험적 단점을 극복하기 위해 비교적 실험이 수월한 배터리 셀 실험을 통해 도출한 IC값을 팩 레벨로 증가적으로 변환하여 배터리 팩의 용량을 추정할수 있는 방법이 연구되어지고 있다[23]. 배터리 셀이 N_s 직렬 N_p 병렬 연결된 배터리 팩을 배터리 셀로 증가적인 IC값을 도출하기 위해 먼저 직렬연결된 경우에 대한 증가 수식을 설계한다. 직렬 연결된 배터리 모듈의 증분용량(IC_S) 수식은 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$IC_S = \frac{\Delta Q}{\Delta(V_1 + V_2 + V_3 \dots + V_{N_s})} \quad (3)$$

식 (3)은 N 개의 배터리 셀전압이 합산된 직렬모듈에 대한 증분용량 수식으로 나타낼 수 있는데 이때 직렬된 N_s 개의 배터리가 불균형 없이 동일 하다면 배터리 팩에 적용된 배터리 셀의 전압 V_C 로 동일하다고 가정할 수 있으므로 팩의 전압 증분용량 식 (4)와 같이 N_s 배된 형태로 수식을 정리할 수 있다. 최종적으로 직렬 연결된 모듈의 IC값은 배터리 셀의 IC값인 IC_C 를 직렬개수로 나눠주는 형식의 수식으로 나타낼 수 있다.

$$IC_S = \frac{\Delta Q}{\Delta(N_s \times V_C)} \quad (4)$$

$$IC_S = \frac{1}{N_s} \times IC_C$$

병렬연결된 경우의 모듈은 직렬과 반대로 N_p 개의 배터리 셀의 전류가 합산되는 형태로 식 (5)와 같이 병렬연결된 배터리의 증분용량(IC_P)을 나타낼 수 있다. 이 때 병렬된 N_p 개의 배터리가 불균형 없이 동일하다면 배터리 셀의 전하량을 Q_C 로

나타내고 식 (5)와 같이 N_p 배된 형태로 수식을 정리할 수 있다. 최종적으로 배터리 셀이 병렬 연결된 배터리 팩의 IC는 식 (6)과 같은 셀의 IC값인 IC_C 를 병렬개수로 곱해주는 형식의 수식으로 나타낼 수 있다.

$$IC_P = \frac{\Delta(Q_1 + Q_2 + Q_3 \cdots + Q_{N_p})}{\Delta V} \quad (5)$$

$$IC_P = \frac{\Delta(N_p \times Q_C)}{\Delta V} \quad (6)$$

$$IC_P = N_p \times IC_C$$

따라서 배터리 셀이 N_s 직렬, N_p 병렬 연결된 구조를 갖는 배터리 팩의 증분용량 IC_{Pack} 는 식 (7)과 같이 배터리 셀의 증분용량값이 직병렬 연결된 개수로 스케일링 된 형태로 정리될 수 있다.

$$IC_{Pack} = \frac{N_p}{N_s} \times IC_C \quad (7)$$

2.4.2 배터리 팩 실험세트 구성

2.4.1 절에서 설계한 팩 레벨의 증분용량 수식을 배터리 팩과 팩에 적용된 배터리 셀을 충방전 실험한 결과를 통해 수식검증을 진행한다. 실험을 진행할 배터리 팩은 INR 18650-29E 배터리가 7직렬 20병렬(7S20P) 연결되고 21V ~ 28V 전압범위 내에서 최대 충전 5A, 방전 15A 조건으로 사용가능한 물류로봇용 배터리 팩으로 자세한 배터리 팩사양은 Table 2.6으로 정리한다. Fig 2.16은 배터리 팩 내부의 배터리 셀의 직렬 간 전압, 모듈 전압, 모듈 전류를 측정하기 위해 신호선과 션트저항을 부착한 모습으로 배터리 팩 개략도에서 전압측정 위치를 상세하게 나타낸다. 이후 팩 실험을 진행하기 위해 실험세트를 구성한다. 배터리 팩 실험 세트는 100V 50A급의 Neware-CT-4001 배터리 충방전기(Battery tester), 배터리 팩, HIOKI사의 LR8450 데이터 로거, 계측용 PC로 구성되고 Fig 2.17과 같다. 배터리 팩 실험 세트 구성 후 충방전 실험을 진행하기 위한 충방전 조건은 다음과 같이 설정한다. 만방 21V에서 만충 28V까지 5A 조건으로 CC-CV(정전류-정전압), 1.25A(0.025C) CV Cut-off 하는 충전조건, 10A 조건으로 CC(정전류) 방전하는 조건, 충방전 사이에 Rest 1시간 30분으로 조건으로 설정한다.

Table 2.6 LIB-24-A Module specification

Specification	
LIB-24-A Module	
Dimension(mm)	Width : 297.6 X 362mm Height : 84.8mm
Nominal Voltage	25.5V
Nominal Capacity	52Ah
Charge Voltage	28V
Discharge Voltage	21V
Standard Current	Charge : 5A Cut-off current : 0.025C Discharge : 15A
Cycles	≥ 3000 Cycle



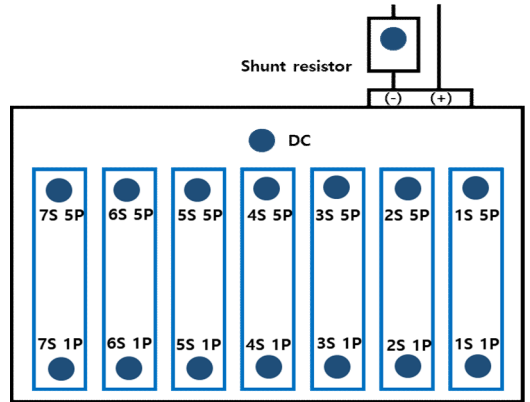
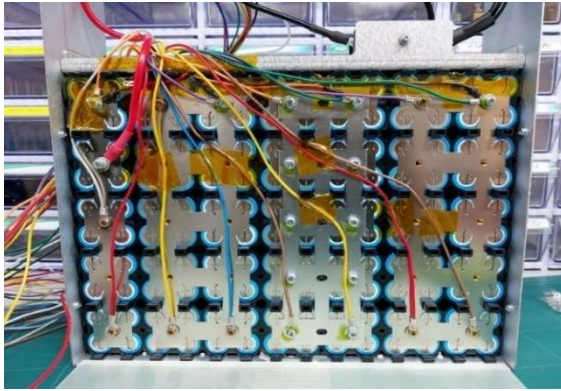


Figure 2.16 Schematic diagram of voltage measurement for battery pack

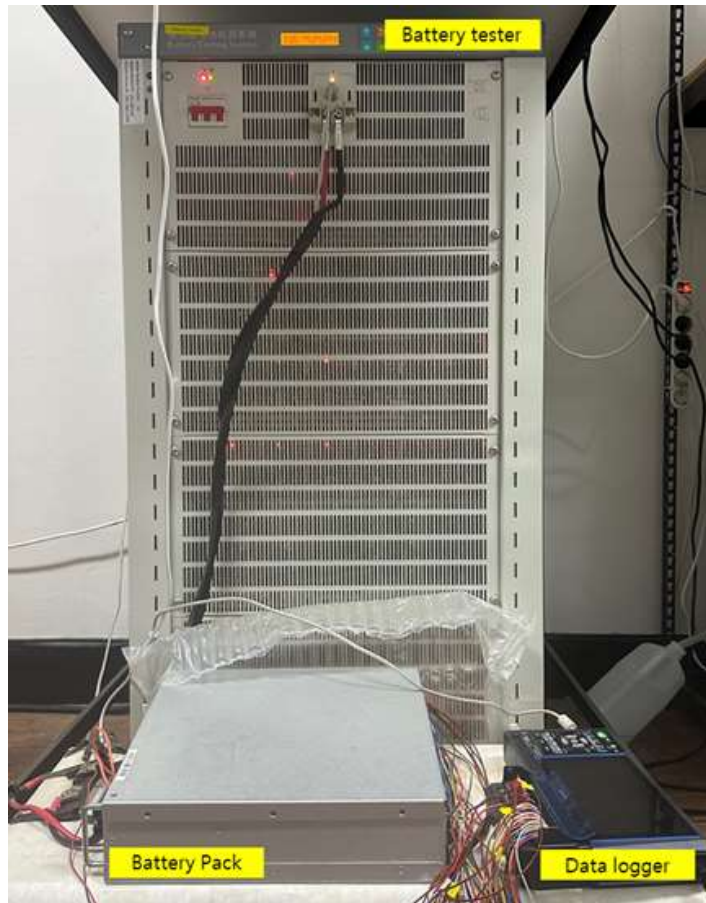


Figure 2.17 Battery pack experiment set

2.4.3 배터리 팩의 증분용량 설계식 검증

본 절에서는 배터리 팩 충방전 시험 결과와 배터리 셀 시험 결과를 이용하여 앞서 설계된 배터리 팩의 등가적 증분용량 수식을 검증한다. Fig 2.18 (a)는 배터리 팩 전압, Fig 2.18 (b)는 배터리 팩 내 7개의 직렬 전압, Fig 2.18 (c)는 배터리 팩 전류의 실험결과를 나타낸다. Fig 2.19는 배터리 팩에 적용되는 INR 18650-29E 배터리 셀을 충방전 실험한 결과로 전류조건은 배터리 팩이 20병렬로 이루어져 있어 1/20 수준인 충전 0.25A, 방전 0.5A으로 하였다. 배터리 팩 충방전 실험 결과와 배터리 셀 실험 결과로 IC curve를 도출하고 배터리 셀의 IC curve에 등가 수식을 적용하여 배터리 팩 IC curve와 비교해 IC curve 간 오차를 비교한다.

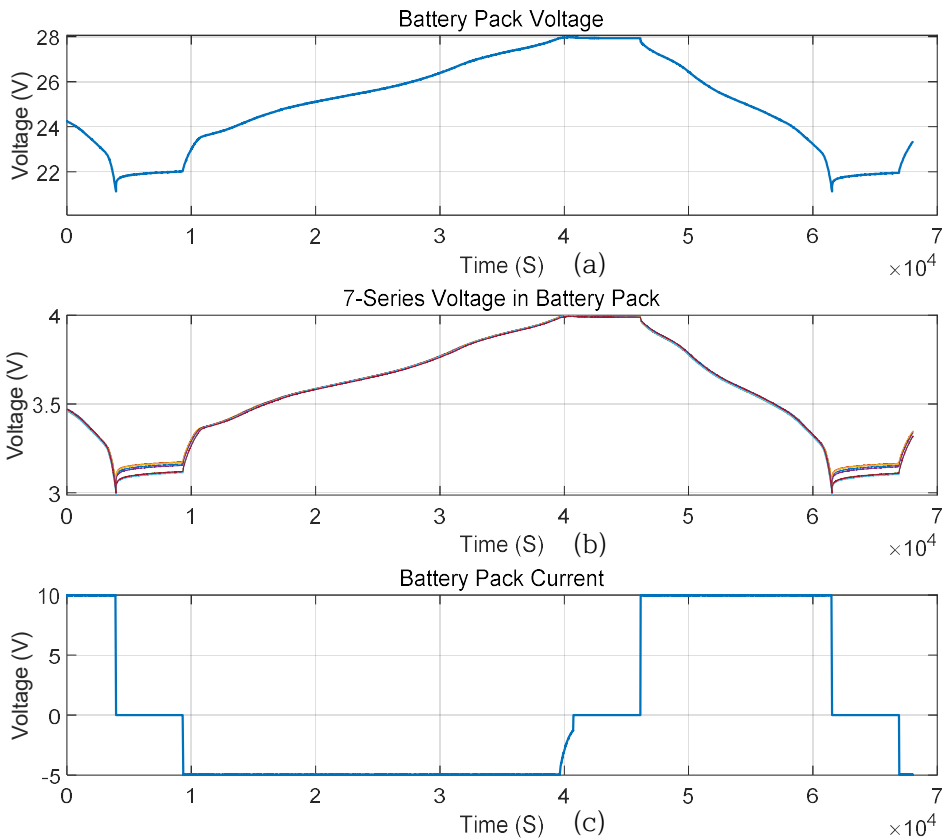


Figure 2.18 CC-CV experimental result of (a) pack voltage, (b) 7-series voltage, (c) pack current

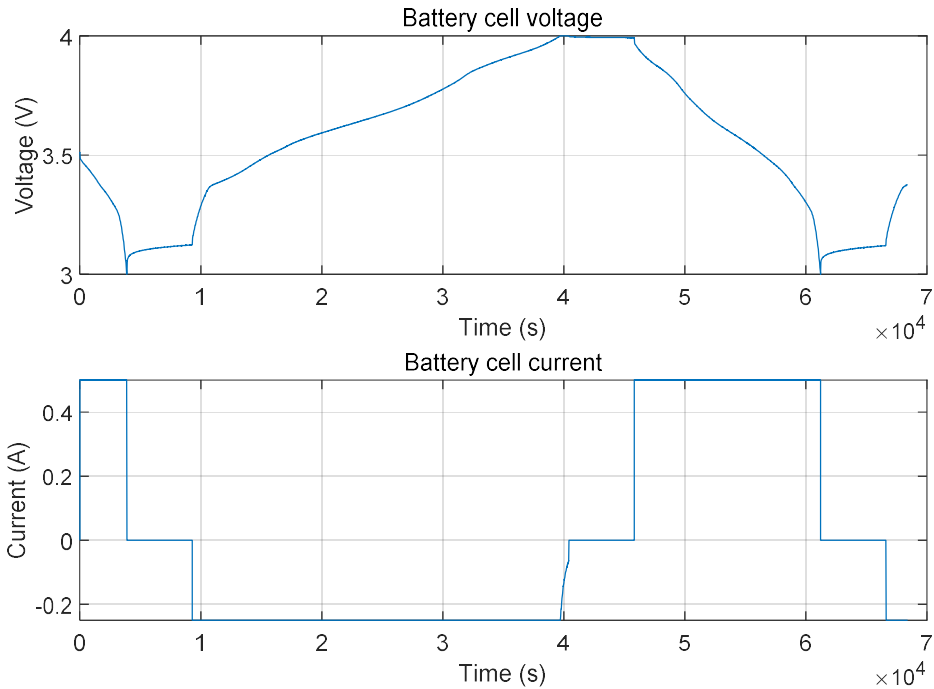


Figure 2.19 Results of battery cell voltage and Current

Fig 2.20 (a)는 배터리 팩의 IC curve, Fig 2.20 (b)는 1S20P 배터리 모듈의 IC curve, Fig 2.20 (c)는 배터리 셀의 IC curve를 나타내고 있다. 세 조건을 비교하기 위 각 조건의 IC curve에 식(6)을 적용하고 배터리 팩의 IC curve를 비교한 결과를 Fig 2.21으로 나타낸다. 이후 IC curve에서 나타나는 3개의 특이점인 피크 IC값을 비교한 결과를 Table 2.7로 정리한다. 이때 Fresh 조건에서의 배터리 팩 용량과 배터리 팩의 용량을 셀의 병렬 개수로 나눈 용량과 유사한 지점의 배터리 셀의 용량을 비교한 결과 0.4% 용량 오차가 존재한다. 배터리 용량편차를 감안하고 배터리 팩 기준 350mV 전압 증가량 조건, 배터리 셀 기준 50mV의 전압 증가량 조건에 대한 IC 피크값 오차 비교시, 배터리 팩과 배터리 팩 내부 셀 또는 모듈을 확장하여 모든 IC 피크값 비교시 최대 3.06% 이내로 오차 나타낼 수 있다. 이를 통해 하위 시스템에서 상위 시스템으로 IC값을 확장할 수 있음을 확인한다.

EV 또는 ESS등 산업계에서 사용되고 있는 다직렬, 다병렬 연결되어 제작된 배터리시스템은 배터리 셀의 충전상태, 내부저항 편차, 용량 편차등 초기 제조오차와 배터리 사용에 따른 배터리 셀 간 파라미터 편차가 증가되면서 배터리 팩 내부에

셀 간 불균형이 발생하게 된다. 하지만 설계된 등가적 방법은 기존 연구에서도 셀 간 불균형이 없거나 미미한 조건에서만 검증을 진행했기 때문에 실제 배터리 팩내 셀 간 불균형이 있는 경우에 대해서도 분석이 필요하다. 배터리 팩 내부 셀의 불균형 특징을 만들기 위해서는 장기간 실험을 진행 해야하고 팩 내부에 셀 간 불균형을 예방하기 위한 밸런싱이 적용되어 있기 때문에 실험실 레벨에서의 충방전 실험으로는 셀 간 불균형을 크게 만들기 어려운 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 배터리 팩 시뮬레이션 모델을 설계 및 검증을 진행하고, 검증된 배터리 팩 모델 내부 주요 파라미터 변동에 대한 IC 값 변화를 분석한다. 이를 통해 배터리 셀 레벨에서 배터리 팩 레벨로 확장 가능성을 제시한다.

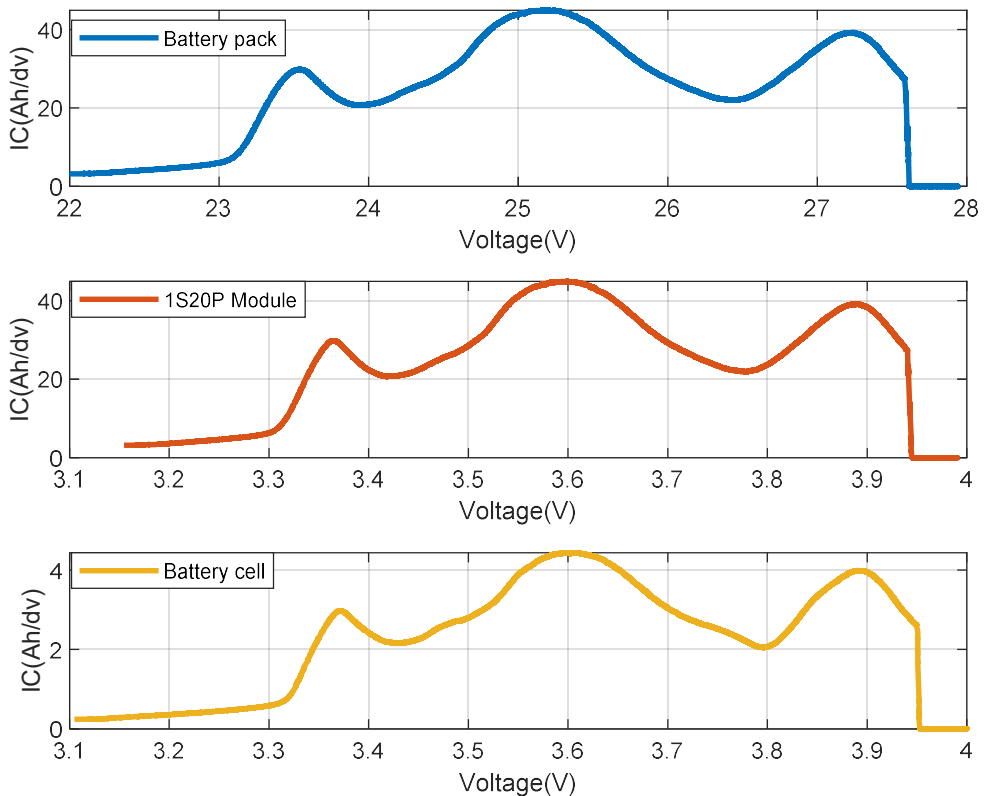


Figure 2.20 Voltage - IC curve (a) Battery Pack, (b) 1S20P Battery module, (c) Battery Cell

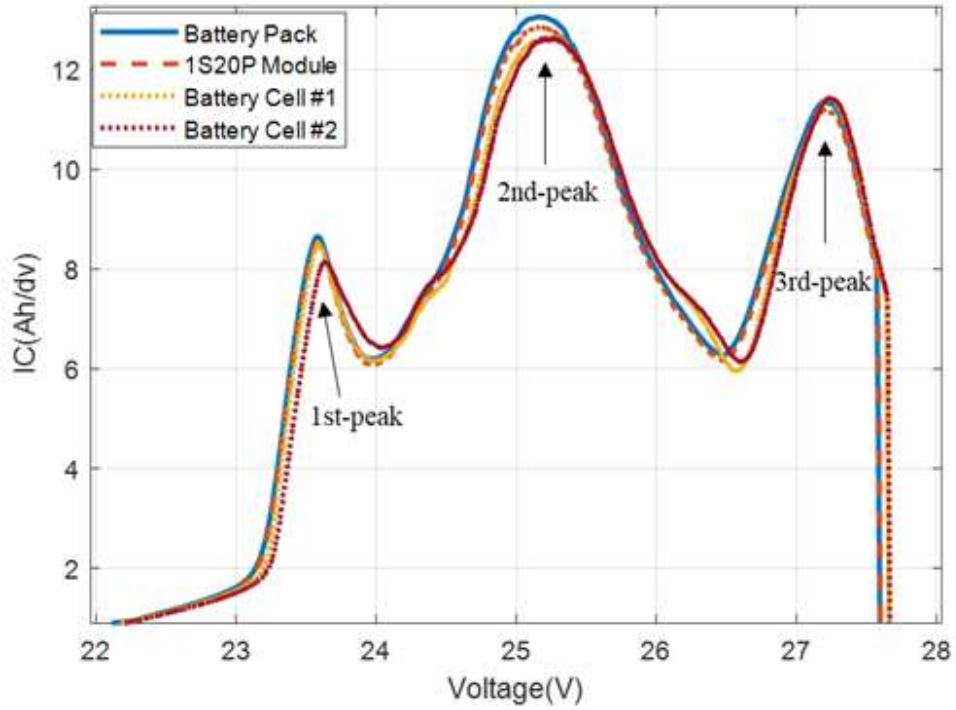


Figure 2.21 Comparison of voltage-IC curve

Table 2.7 Comparison of various condition

	Pack IC	1S20P IC	Cell IC	error	
				Pack vs 1S20P	Pack vs Cell
1st-peak	8.50	8.51	8.48	0.11%	0.23%
2nd-peak	13.06	12.81	12.66	1.91%	3.06%
3rd-peak	11.42	11.20	11.38	1.92%	0.35%

제 3 장 배터리 상태변화에 따른 증분용량 추정 성능 분석

3.1 배터리 전기적 등가회로 모델링

3.1.1 배터리 셀 모델링

본 장에서는 배터리 상태변화에 따른 증분용량 추정 성능 분석을 진행하기 위해 배터리 셀의 전기적 등가회로 모델링을 설계한다. 배터리 특성을 모사하기 위해 다양한 전기적 등가회로 모델(ECM)에 대한 연구가 진행되고 있다[30-33]. 다양한 배터리 모델링이 존재하지만 Fig 3.1과 같이 1-RC Ladder을 적용한 모델을 사용하여 배터리 모델링을 진행한다. 1-RC Ladder가 적용된 배터리 모델 내부의 파라미터는 개방전압(Open Circuit Voltage)(V_{OCV}), 직렬저항(R_i), 확산 저항(R_{diff}), 확산 커패시턴스(C_{diff})가 존재하며, 이를 식 (8)로 정리할 수 있다. 배터리 모델의 파라미터들은 배터리 OCV(Open Circuit Voltage) 실험을 통해 SOC에 따른 결과로 도출할 수 있다. 실험을 통해 도출된 IFR 26650-3400 배터리, INR 18650-29E 배터리, INR 21700-50S 배터리의 파라미터를 Table 3.1 ~ Table 3.3에 정리한다. 도출한 파라미터를 적용한 Matlab/Simulink/Simscape 배터리 시뮬레이션 모델은 Fig 3.2와 같고 이를 검증하기 위해 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교한다. Fig 3.3 ~ Fig 3.5 (a)는 각 배터리 별 실험 전압과 시뮬레이션 전압을 비교한 결과이다. Fig 3.3 ~ Fig 3.5 (b)는 실험/시뮬레이션 간 전압 오차를 나타낸 결과로 배터리의 Low-SOC 구간에서 비선형성이 크기 때문에 오차가 다소 크게 나타나지만 배터리의 전체 동작 영역에서는 각각의 배터리는 0.0124V, 0.0115V, 0.0049V의 root mean squared error(RMSE) 크기로 설계한 배터리 시뮬레이션 모델의 실제 배터리를 잘 모사할 수 있음을 확인하였다.

$$V_{terminal} = V_{OCV} - IR_i - IR_{diff}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (8)$$

$$where, \tau = R_{diff} \times C_{diff}$$

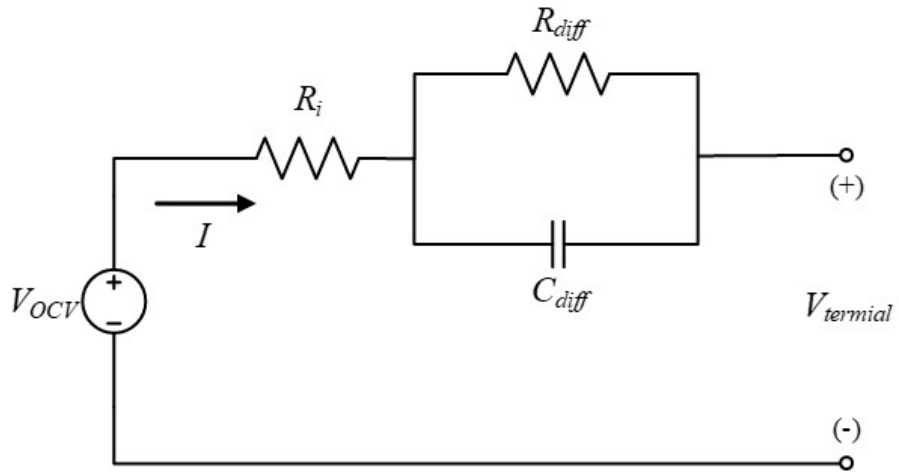


Figure 3.1 Equivalent electrical circuit model of lithium battery

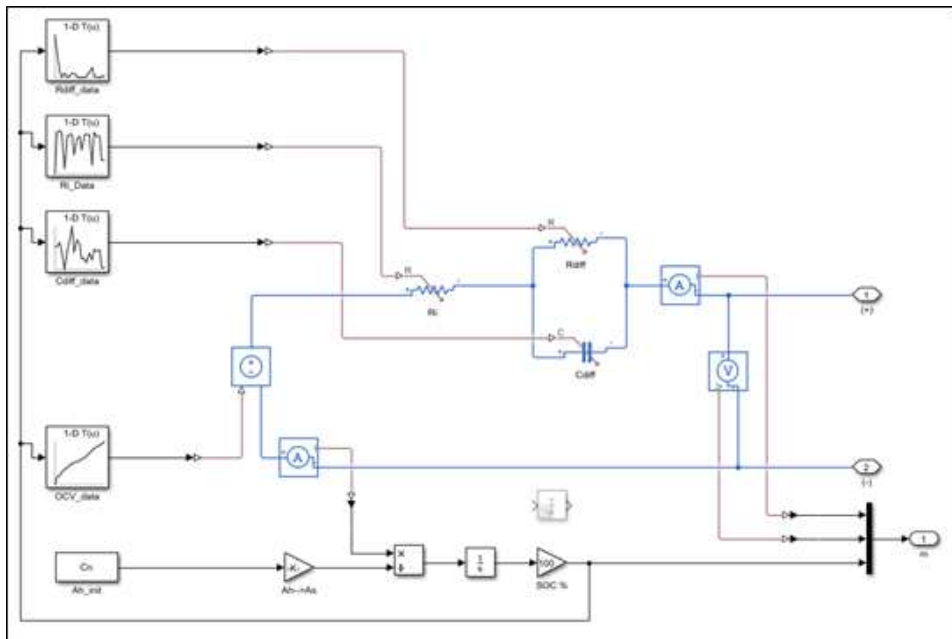


Figure 3.2 lithium battery simulation model

Table 3.1 IFR 26650-3400 parameters

SOC (%)	OCV (V)	Ri (Ω)	Rdiff (Ω)	Cdiff (F)
0	2.8655	0.0358	0.0568	357.50
10	3.2118	0.0330	0.0568	556.23
20	3.2480	0.0350	0.0476	684.77
30	3.2759	0.0352	0.0442	817.18
40	3.2899	0.0343	0.0403	754.93
50	3.2924	0.0347	0.0346	615.52
60	3.2989	0.0349	0.0362	509.57
70	3.3237	0.0330	0.0414	712
80	3.3311	0.0345	0.0343	822.31
90	3.3314	0.0340	0.0364	244.95
100	3.3640	0.0340	0.0364	244.95

Table 3.2 INR 18650-29E parameters

SOC (%)	OCV (V)	Ri (Ω)	Rdiff (Ω)	Cdiff (F)
0	3.2648	0.0305	0.1	5420
10	3.4037	0.0285	0.0214	3556
20	3.5054	0.0273	0.0239	2676
30	3.5770	0.0270	0.0254	3537
40	3.6328	0.0270	0.0198	2970
50	3.7017	0.0262	0.0202	1224
60	3.8176	0.0263	0.0329	1819
70	3.8951	0.0268	0.0305	1917
80	3.9757	0.0268	0.0231	2513
90	4.0740	0.0273	0.0168	4454
100	4.1152	0.0273	0.0170	2277

Table 3.3 INR 21700-50S parameters

SOC (%)	OCV (V)	Ri (Ω)	Rdiff (Ω)	Cdiff (F)
0	3.2102	0.0141	0.0394	1188
10	3.3921	0.013	0.0269	1591
20	3.5045	0.0129	0.0136	2142
30	3.6071	0.0127	0.0137	3076
40	3.6957	0.013	0.0147	4100
50	3.7751	0.0127	0.0112	3516
60	3.8590	0.0129	0.0165	1541
70	3.9373	0.0129	0.0198	2383
80	4.0376	0.0129	0.0131	4147
90	4.0796	0.0127	0.01	5372
100	4.1264	0.0127	0.0125	1722

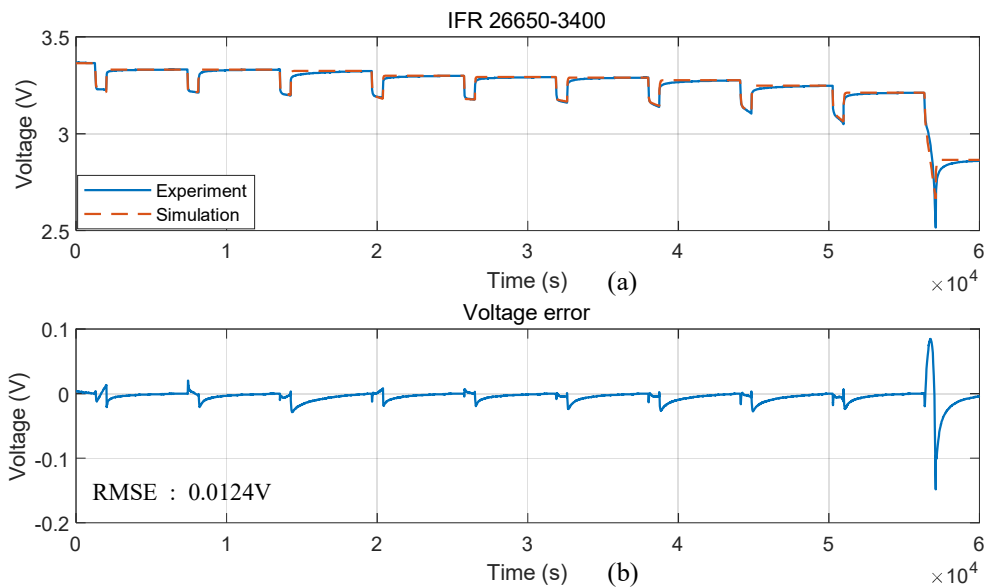


Figure 3.3 Simulation modeling verification IFR 26650-3400 (a) experimental and simulation voltage results, (b) modeling voltage error

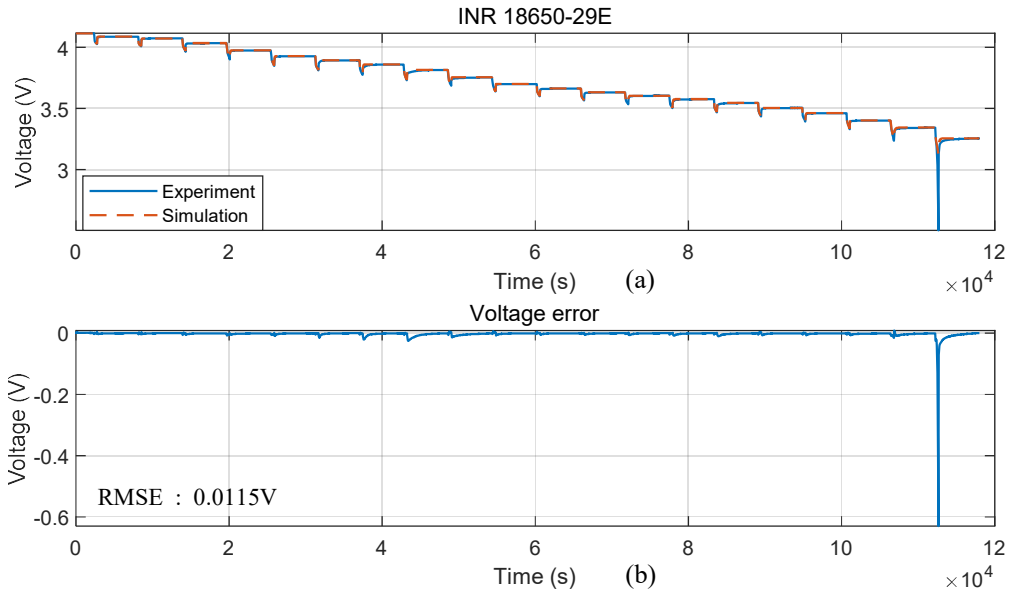


Figure 3.4 Simulation modeling verification IINR 18650-29E (a) experimental and simulation voltage results, (b) modeling voltage error

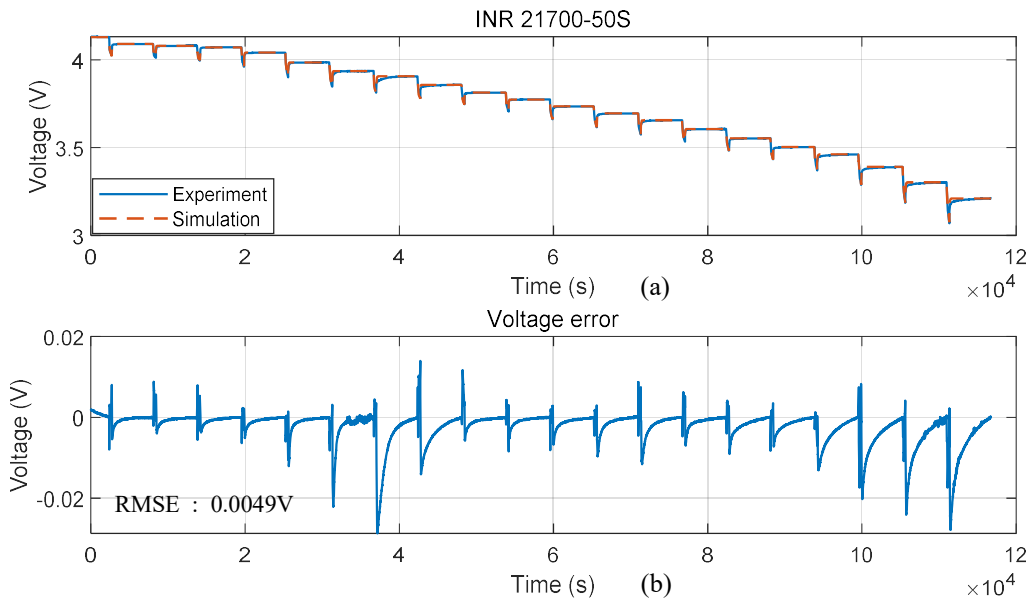


Figure 3.5 Simulation modeling verification INR 21700-50S (a) experimental and simulation voltage results, (b) modeling voltage error

3.1.2 배터리 팩 모델링

본 절에서는 배터리 팩 모델링 설계 방법을 제시한다. 배터리 팩은 INR 18650-29E 배터리 셀을 20병렬한 후 7직렬 연결된 형태로 Fig 3.6의 배터리 팩 구성도와 같다. 배터리 팩 모델링시 하위 모델인 배터리 셀까지 모델링을 진행한다면 배터리 팩 모델이 무거워지고 그로 인해 시뮬레이션 시간이 증가되는 문제가 있다. 이를 보완하기 위해 20병렬된 직렬 모듈을 1개의 배터리 모델로 만들고 배터리 모델을 7직렬한 형태로 모델링을 간략화 하였다. 배터리 팩 모델의 각 직렬 모듈 별 파라미터를 도출하기 위해 앞서 배터리 팩 OCV 실험 중 측정된 직렬모듈(1S20P) 결과를 가지고 모델링에 필요한 파라미터를 도출하여 Table 3.4로 정리하였다. 그 후 도출한 파라미터를 적용한 Matlab/Simulink/Simscape 배터리 시뮬레이션 모델을 검증하기 위해 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하였다. Fig 3.7 (a)는 1S20P의 직렬 모듈에 대한 전압과 시뮬레이션 전압을 비교한 결과이다. Fig 3.7 (b)는 실험/시뮬레이션 간 전압 오차를 나타낸 결과로 배터리의 Low-SOC 구간에서 비선형성이 크기 때문에 오차가 다소 나타나지만 배터리의 전체 동작 영역에서는 각각의 배터리는 0.0022V의 root mean squared error(RMSE) 오차가 나타나 직렬 모듈 모델링이 실제 배터리를 잘 모사할 수 있는것을 확인 하였다. 이후 직렬 모듈을 7직렬 연결한 배터리 팩 시뮬레이션 모델의 정확성 검증을 위해 배터리 팩에 대한 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하였다. Fig 3.8 (a)는 배터리 팩 전압과 시뮬레이션 전압을 비교한 결과이다. Fig 3.8 (b)는 실험/시뮬레이션 간 전압 오차를 나타낸 결과로 배터리 팩 모델링시 배터리 팩 내 다양한 컴포넌트들을 간략히 반영하여 오차가 증가되었지만 0.0351V의 root mean squared error(RMSE) 오차를 도출하여 배터리 팩 모델의 정확성을 검증하였다.

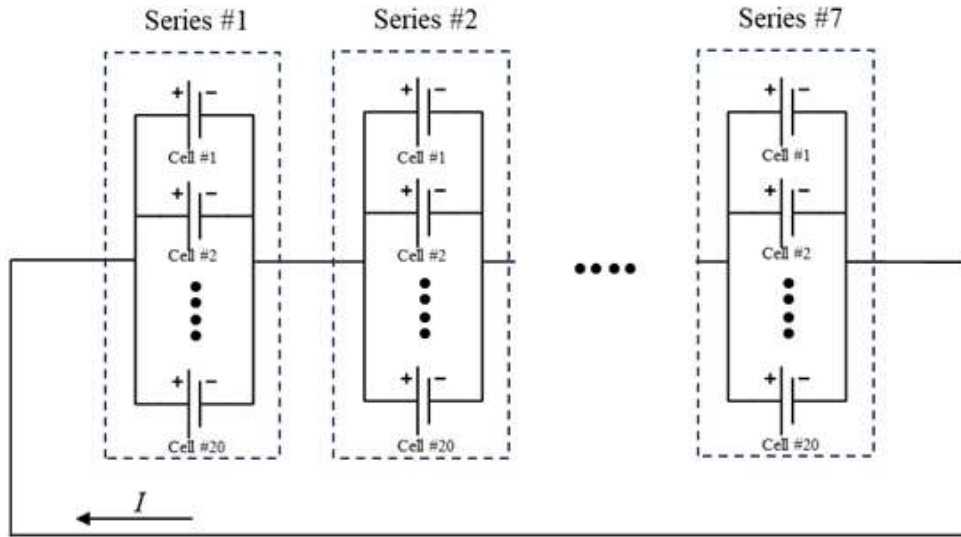


Figure 3.6 LIB-24-A battery pack configuration

Table 3.4 Parameters of 1S20P Battery serial module

SOC (%)	OCV (V)	Ri (Ω)	Rdiff (Ω)	Cdiff (F)
0	3.1635	0.0011	0.0083	53094
10	3.3550	0.0011	0.0022	59831
20	3.4560	0.0011	0.0019	9885
30	3.5250	0.0010	0.0014	61245
40	3.5825	0.0011	0.0019	41999
50	3.6280	0.0011	0.0011	55666
60	3.6820	0.0010	0.0012	30009
70	3.7685	0.0011	0.0020	39566
80	3.8565	0.0011	0.0015	47188
90	3.9120	0.0011	0.0011	46474
100	3.9910	0.0011	0.0015	14363

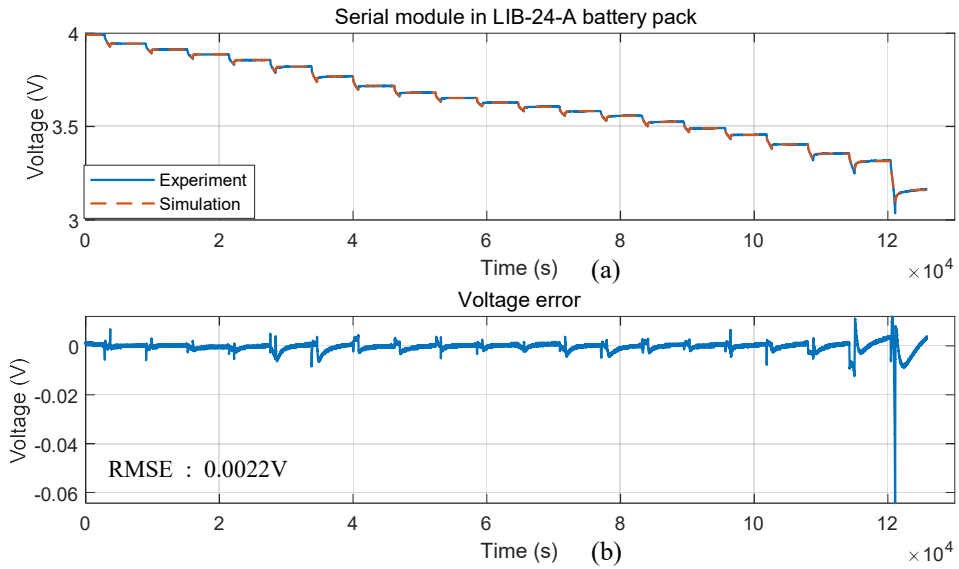


Figure 3.7 Simulation modeling verification of 1-serial module in LIB-24-A battery pack (a) experimental and simulation voltage results, (b) modeling voltage error

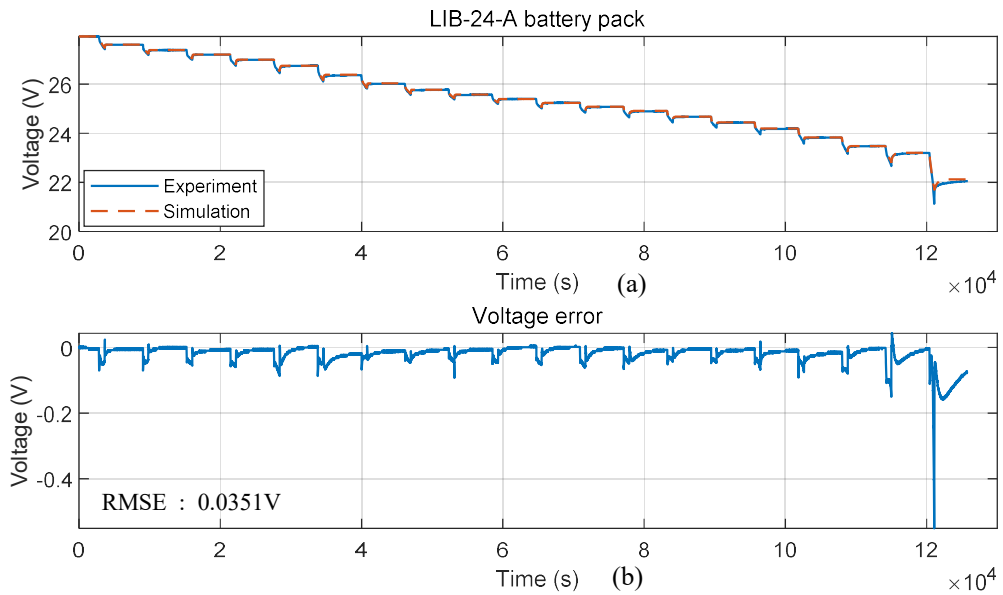


Figure 3.8 Simulation modeling verification LIB-24-A battery pack (a) experimental and simulation voltage results, (b) modeling voltage error

3.2 배터리 상태에 따른 증분용량 추정 성능 분석 결과

3.2.1 배터리 셀의 증분용량 추정 성능 분석 결과

본 절에서는 배터리 셀의 노화에 따른 증분용량 추정 성능을 분석한다. 앞서 2.3장에서 설계한 증분용량 인자를 적용하여 각 배터리 셀에 대한 용량 추정 수식을 설계하고 설계된 수식을 통해 배터리 셀의 용량을 추정한다. 용량 추정을 위한 수식은 배터리 노화에 따른 IC 피크값과 그때의 셀 용량으로 1차 함수 형태로 설계하였다. 결정계수(R-squared)는 관측값에서 관측값의 평균을 뺀 결과인 분산과 추정값에서 관측값의 평균을 뺀 결과의 비율을 나타낸다. Fig 3.9는 IFR 26650-3400 배터리 노화에 따른 용량추정 결과와 추정모형을 나타내고 있다. 이때 실험 측정된 결과는 점(dot)으로 추정모형은 실선으로 나타내었다. 용량추정 모형은 용량에 대한 오차 RMSE로 나타내었고, 그 결과 RMSE 0.05%의 용량추정 정확도를 갖는다. Fig 3.10은 INR 18650-29E 배터리 노화에 따른 용량추정 결과로 RMSE 0.33%의 용량추정 정확도를 갖는다. Fig 3.11은 INR 21700-50S 배터리 노화에 따른 용량추정 결과로 RMSE 0.4%의 용량추정 정확도를 갖는다. 증분용량 분석법을 통해 각 배터리 셀에 대한 용량을 추정했고 실제 용량과 비교하여 추정 정확도를 확인할 수 있다.

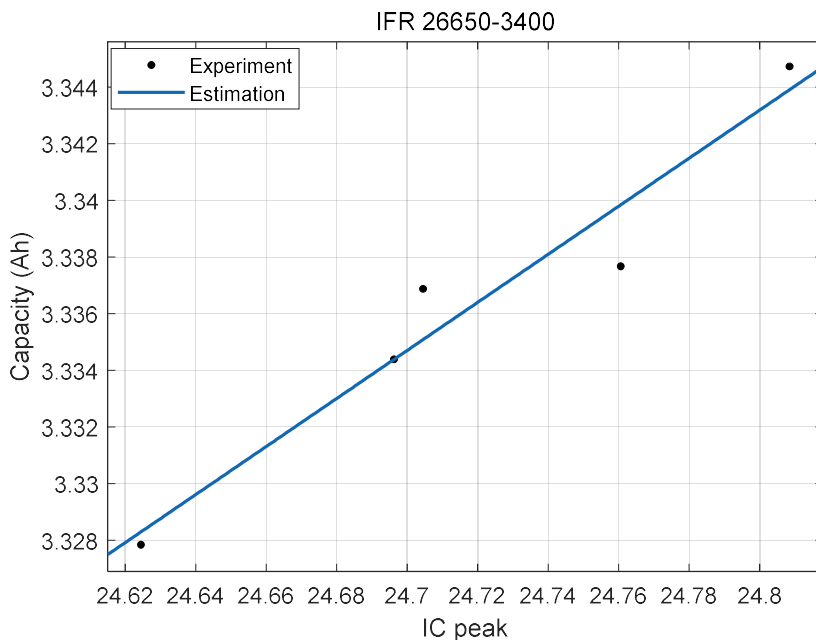


Figure 3.9 Capacity estimation results according to IC peak in IFR 26650-3400

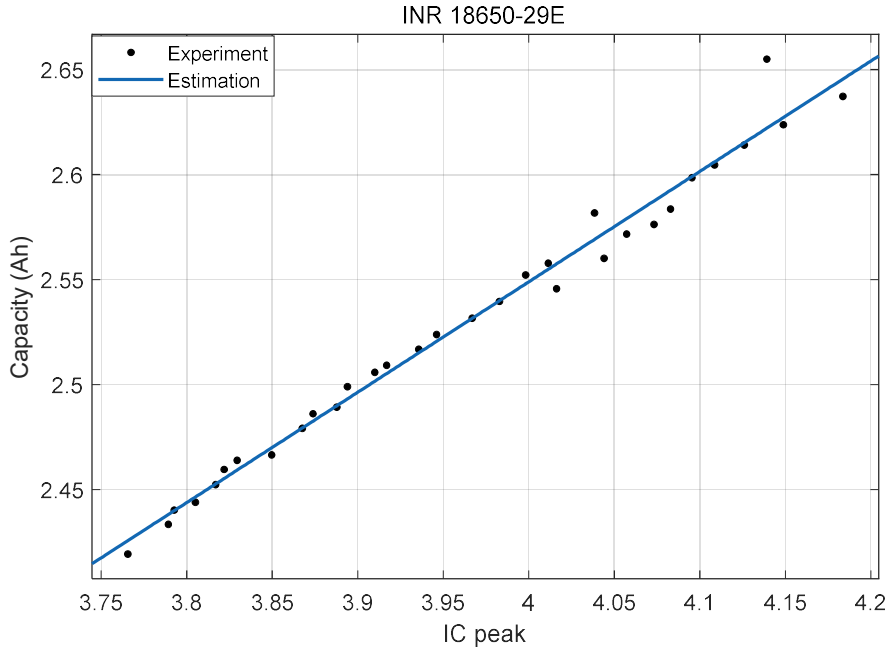


Figure 3.10 Capacity estimation results according to IC peak in INR 18650-29E

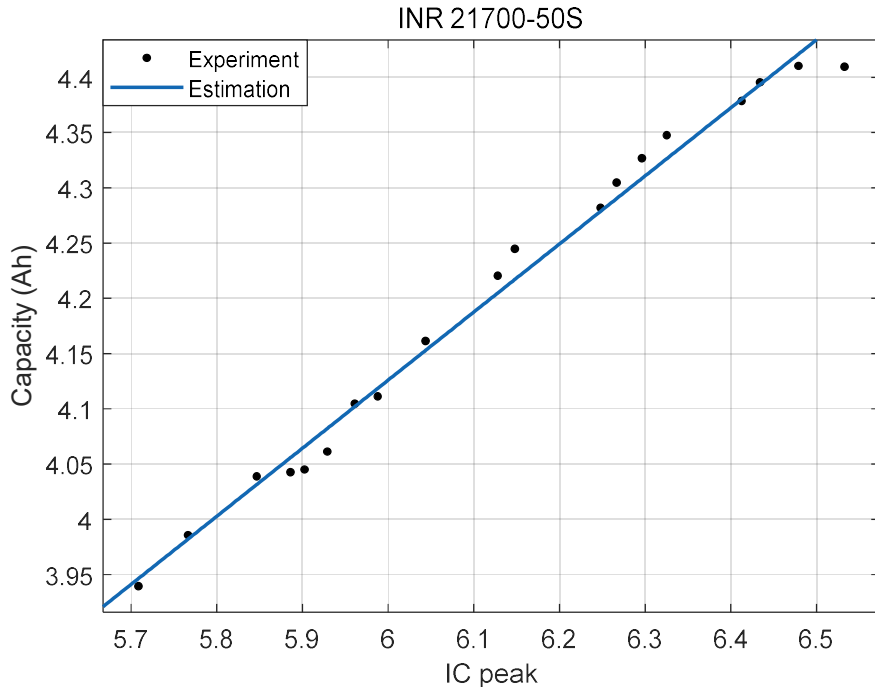


Figure 3.11 Capacity estimation results according to IC peak in INR 21700-50S

3.2.2 배터리 팩의 증분용량 추정 성능 분석 결과

본 절에서는 배터리 팩의 노화에 따른 증분용량 추정 성능 분석 및 배터리 팩 모델링을 통해 배터리 내부 상태변화에 따른 증분용량 추정 성능 분석을 진행한다. 배터리 팩에 대한 용량 추정 수식을 설계하기 전 배터리 팩 내부의 1S20P 연결된 모듈 간 IC Peak 편차를 비교 분석한다. Fig 3.12는 Fresh 상태에서의 모듈(1S20P) 간 IC curve를 나타낸다. Fig 3.13은 충방전 240 사이클(4% 노화) 진행한 배터리 팩 내부 모듈 간 최대 IC Peak 오차를 나타낸 결과이다. 초기 사이클 조건에서 최대 1.8%의 피크값 오차가 나타나지만 충방전 진행에 따라 피크값 오차가 점점 감소되어 0.4% 수준으로 나타난다. 이를 통해 배터리 팩 내부 모듈 간 전압 편차는 없는 수준으로 판단된다. 모듈 간 전압 편차가 없는 것을 검증하기 위해 배터리 팩의 Fresh 조건과 4% 노화된 조건에서의 전압 편차를 비교 분석한다. Fig 3.14 (a)는 Fresh 조건에서의 모듈의 최대/최소 전압을 나타낸 결과이고, 모듈 간 최대 최대 전압 편차는 Fig 3.14 (b)에 나타내었다. 만방 Rest 구간에서는 모듈 간 43mV 수준의 최대 전압 편차가 있지만, 충전 중 최대 8mV 평균 3mV 수준의 전압 편차로 모듈 간 전압 불균형이 없는 것을 확인할 수 있다. Fig 3.15 (a)는 4% 노화된 조건에서의 모듈의 최대/최소 전압을 나타낸 결과이고, 모듈 간 최대 최대 전압 편차는 Fig 3.15 (b)로 나타낸다. 4% 노화시 Fresh 조건보다 만방 Rest 구간에서 13mV 증가한 56mV 수준의 전압 편차가 발생되지만, 충전 중 최대 8.5mV 평균 3mV 수준의 전압 편차로 Fresh 조건에서의 전압 편차 결과와 차이가 없는 것을 볼 수 있다. 배터리 팩의 용량 추정을 위한 설계식은 배터리 모듈 노화에 따른 각 모듈의 평균 전압으로 IC 피크값을 계산하고, 계산된 IC 피크값을 직렬 연결된 모듈 개수만큼 나누어 배터리 팩으로 확장하여 설계한다. 용량과 IC의 관계는 앞서와 동일하게 1차 함수로 피팅하였다. Fig 3.16은 배터리 팩 노화에 따른 용량추정 결과로 용량 추정시 RMSE 0.4%의 추정 정확도를 갖는다.

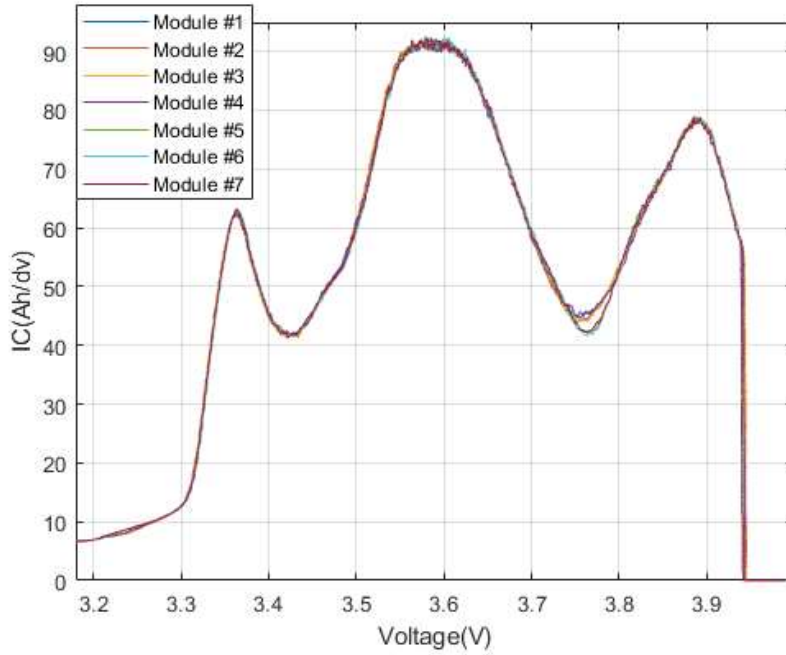


Figure 3.12 IC curve between module in Fresh condition

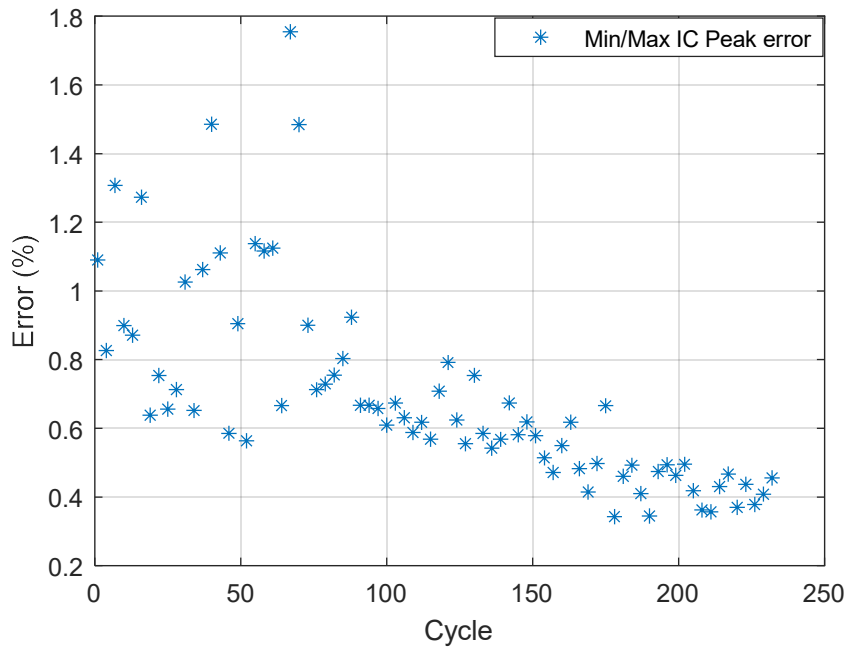


Figure 3.13 Maximum error of IC peak according to aging

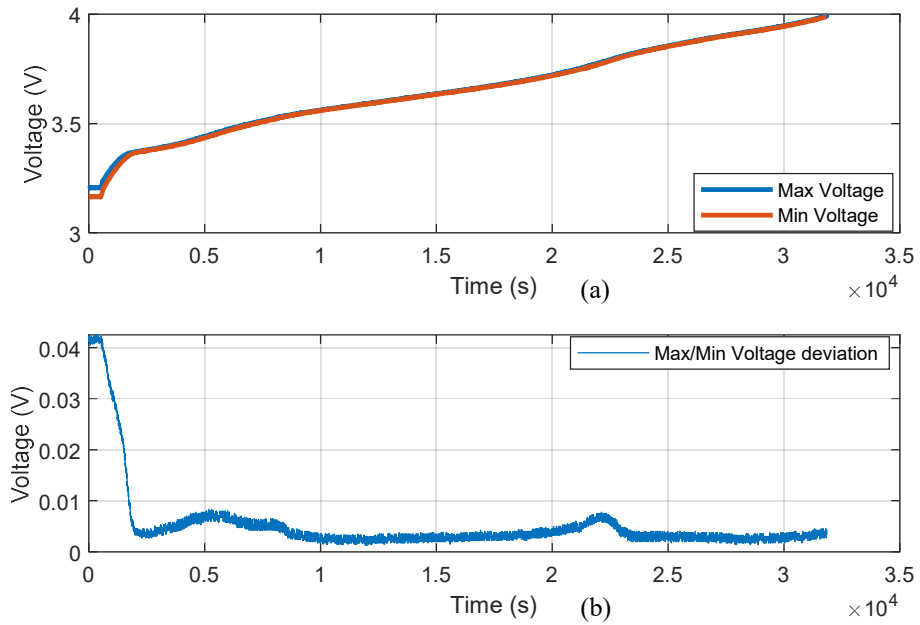


Figure 3.14 Charging experiment results under fresh condition (a) Min/Max module voltage, (b) Maximum voltage deviation

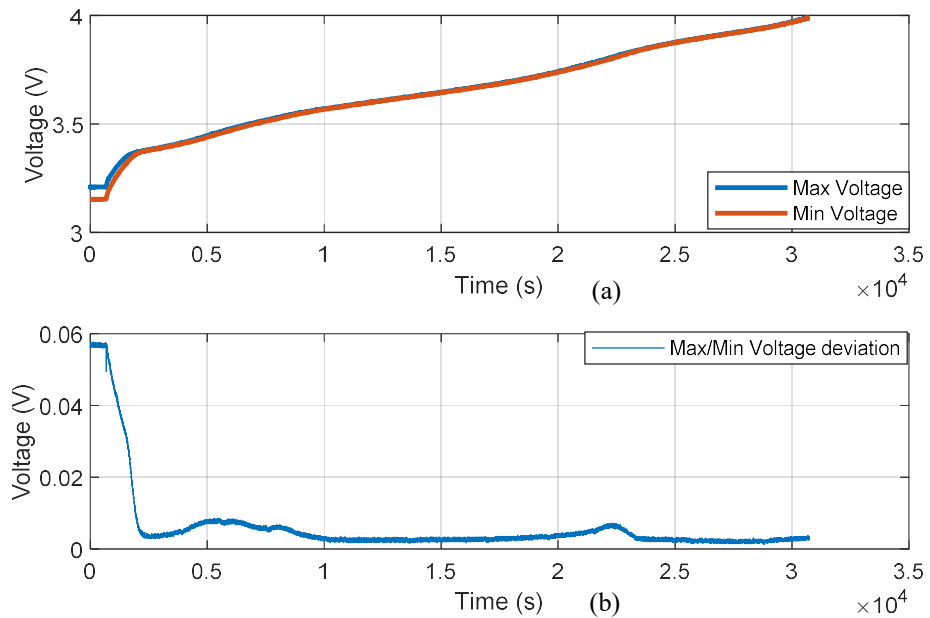


Figure 3.15 Charging experiment results under 4% aging condition (a) Min/Max module voltage, (b) Maximum voltage deviation

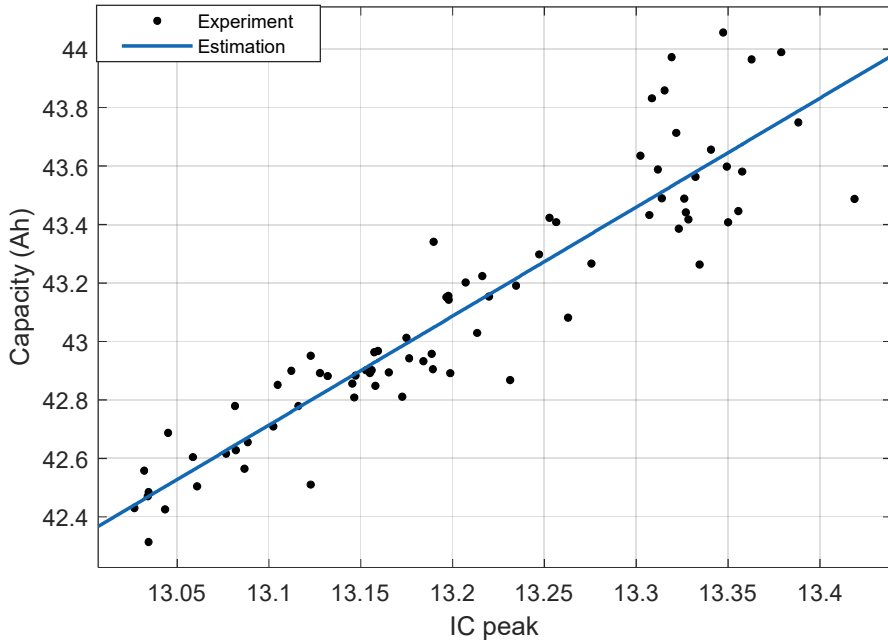


Figure 3.16 Capacity estimation results according to IC peak in Battery pack

본 연구에서 사용중인 배터리 팩은 4% 노화 시켰지만 배터리 팩 내부의 모듈 간 불균형이 나타나지 않았지만 배터리 팩의 노화가 더 진행된다면 내부 모듈 간 불균형이 발생할 가능성이 있다. 하지만 배터리 팩을 노화시키기 위해서는 오랜 시간동안 충방전 실험을 진행해야 한다. 이러한 단점을 보완하기 위해 3.1 절에서 설계한 배터리 팩 시뮬레이션 모델을 통해 실제 배터리시스템에서 일어날 수 있는 배터리 간 불균형이 나타나는 조건을 모사하고 배터리 모듈 레벨의 증분용량 추정 방법을 통해 배터리 팩의 용량 추정성능을 분석한다. 배터리 팩 내부의 모듈 간 불균형은 배터리 모듈 간 SOC, 내부저항, 용량에 대한 편차에 의해 나타날 수 있다. 이러한 모듈 간 불균형의 원인으로서는 배터리 제조 오차인 초기 SOC, 내부저항, 용량에 대한 오차이다. 또한 배터리 팩 사용에 따라 배터리 팩 내부 온도 차이로 인한 내부저항과 용량에 대한 오차도 원인이 된다. Fig 3.17은 파라미터 변화에 따른 전압 그래프를 나타낸 결과로 검은선은 기존 배터리 전압을 나타내고 빨간색 파선은 파라미터 변화시 배터리 전압을 나타낸다[18]. Fig 3.17 (a)는 배터리 내부저항이 증가하는 경우의 배터리 전압을 나타낸 결과로 배터리 전압이 수직적으로 이동되는 형태로 도출된다. Fig 3.17 (b)는 배터리 초기 SOC가 증가하는 경우의 배터리 전압

을 나타낸 결과로 수평적으로 이동되는 형태로 도출된다. Fig 3.17 (c)는 배터리 용량이 감소되는 경우의 배터리 전압을 나타낸 결과로 배터리 전압이 빠르게 증가되면서 배터리 만충전 전압에 빠르게 도달하는 형태로 도출된다. 이러한 배터리 모듈 간 불균형 조건을 배터리 팩 시뮬레이션 모델에 적용하여 배터리 모듈 간 불균형을 모사하고, 불균형이 있는 경우에 대한 증분용량 IC curve의 거동 및 특성을 분석하고 배터리 모듈 레벨에서 배터리 팩 레벨로 증분용량 확장 가능성을 제시한다.

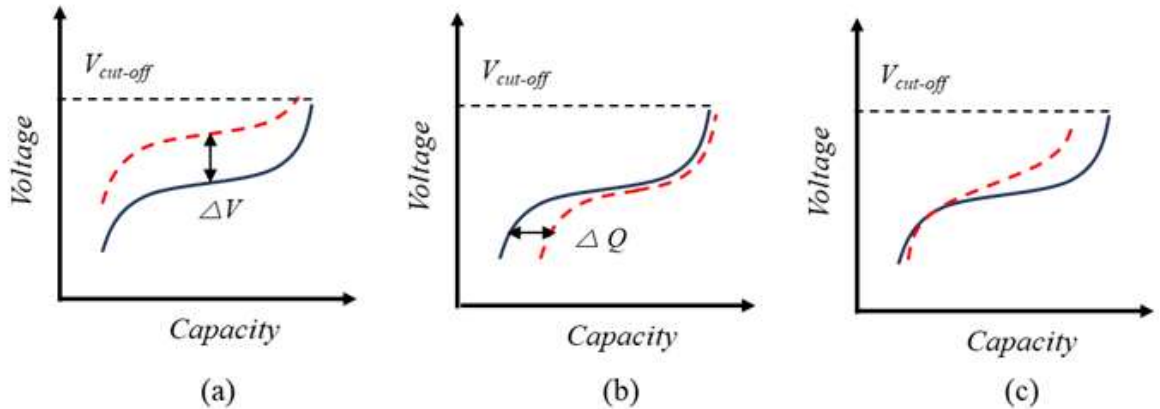


Figure 3.17 Voltage curve according to parameter changes (a) internal resistance difference, (b) initial SOC difference, (c) capacity difference[18]

Fig 3.18은 Matlab/Simulink/Simscape로 배터리 팩 모델링을 진행한 결과를 나타낸다. 그림에서 볼수 있듯이 20병렬된 모듈을 단일 전기적 등가회로 모델링을 하였고, 이를 7직렬 연결하여 배터리 팩을 구성하였다. 배터리 팩 시뮬레이션 모델을 통해 배터리 모듈 간 불균형을 모사한 충전 시뮬레이션을 진행하였다.

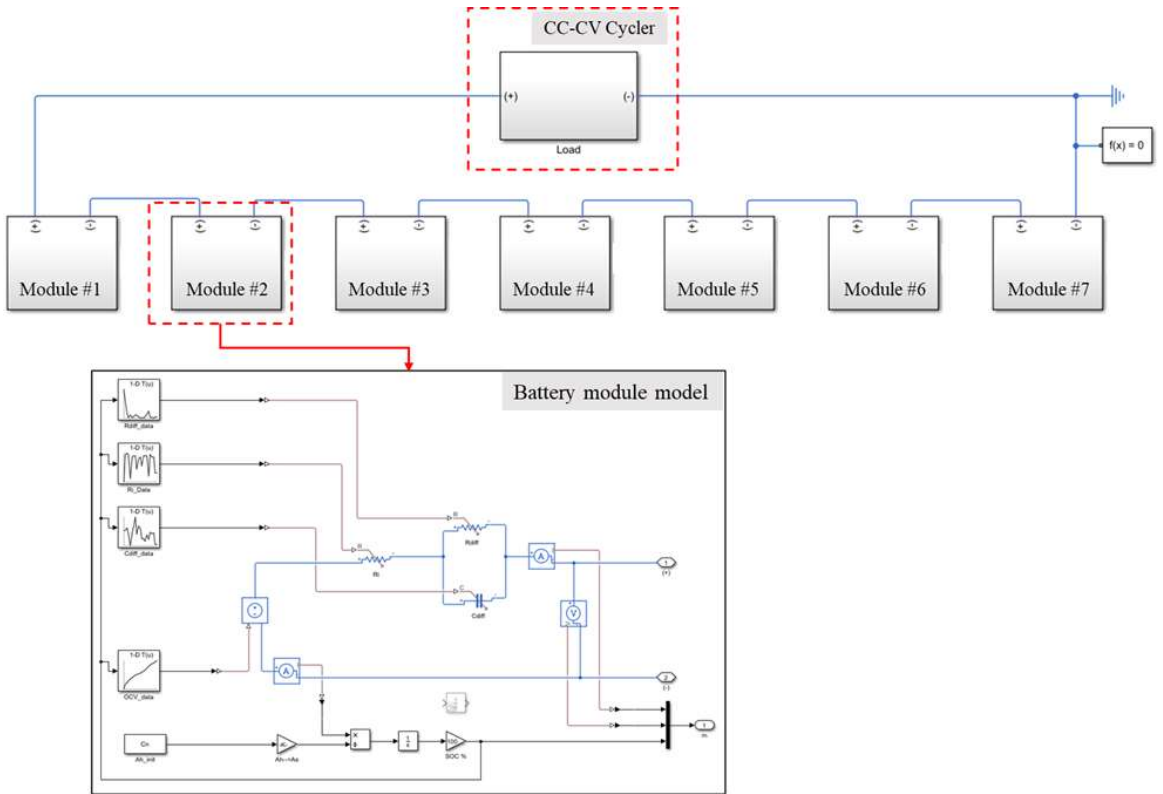


Figure 3.18 7S20P Battery pack simulation model

배터리 셀 간 내부 저항편차는 초기 제조 오차로 인한 내부저항이 최대 10%의 차이가 발생할 수 있다. 이러한 내용을 바탕으로 module #4의 R_i/R_{diff} 파라미터를 다른 모듈들의 파라미터 대비 10% 크게 설정하고 충전하는 시뮬레이션을 진행하였다. 이때 배터리 모듈이 Cut-off voltage에 도달시 충전을 종료하는 시뮬레이션을 진행한다. Fig 3.19는 module #4의 R_i/R_{diff} 파라미터를 10% 증가시킨 후 충전 시뮬레이션 진행한 결과로 Fig 3.19 (a)는 module #1의 전압과 module #4의 전압을 나타낸다. Fig 3.19 (b)는 두 모듈의 전압 편차를 나타낸 결과이고, Fig 3.19 (c)는 부하전류를 나타낸다. 내부저항 편차가 있는 모듈 간 전압 편차는 최대 3.5mV 수준 평균적으로 1.4mV 수준의 전압 편차가 나타난다. 일반적인 저항 편차가 있는 경우 모듈 간 전압 편차가 크게 발생되지 않는다. 이를 통해 module #1의 조건으로 증분용량을 도출하고 모듈 레벨에서의 배터리 팩 레벨로 확장한 증분용량 결과를 비교한다. Fig 3.20은 배터리 모듈과 팩에 대한 증분용량을 도출한 결과를 비교한 과형을 나타낸다. Fig 3.20 (a)는 배터리 모듈의 증분용량 IC curve, Fig 3.20 (b)는 배터리 팩의 증

분용량 IC curve를 나타낸다. Fig 3.20 (c)에서는 모듈 IC인 Fig 3.20 (a)의 결과를 팩으로 확장한 결과와 Fig 3.20 (b)의 결과를 같이 도시한 그림이다. 증분용량 IC curve 비교시 모듈의 IC 피크값은 1.407, 팩의 IC 피크값은 1.433으로 1.8%의 미비한 수준의 오차를 보인다.

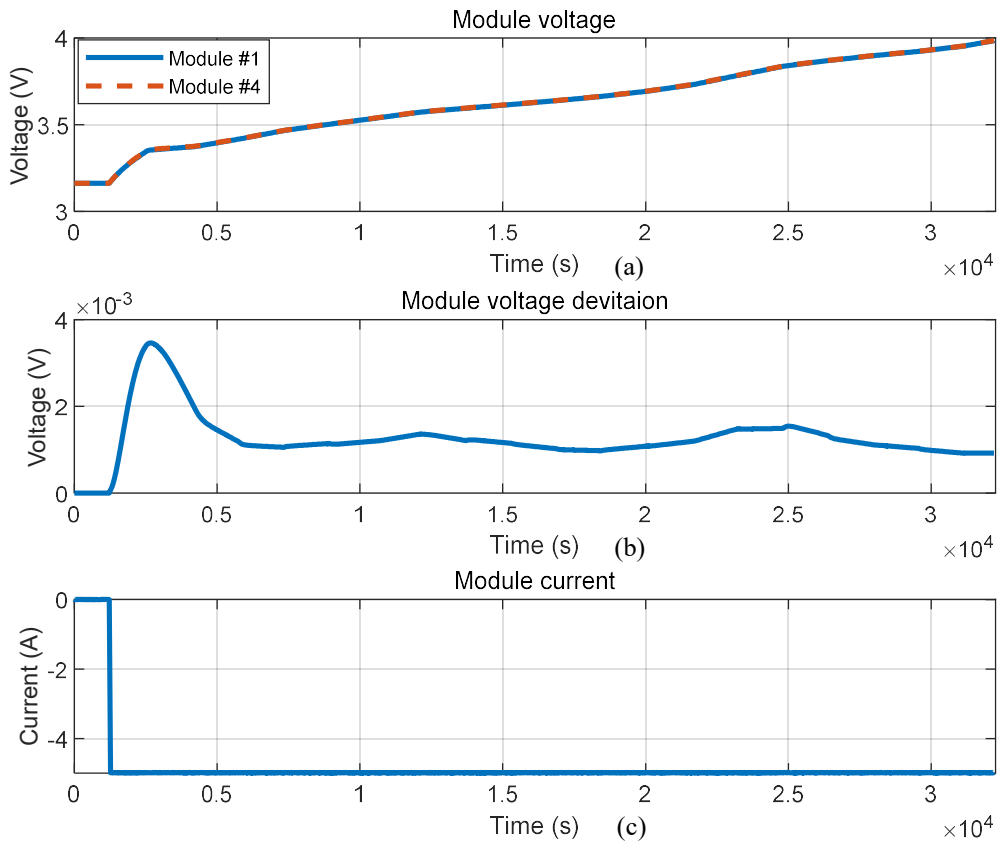


Figure 3.19 Simulation results in case of internal resistance difference, (a) module voltage, (b) module voltage deviation, (c) load current

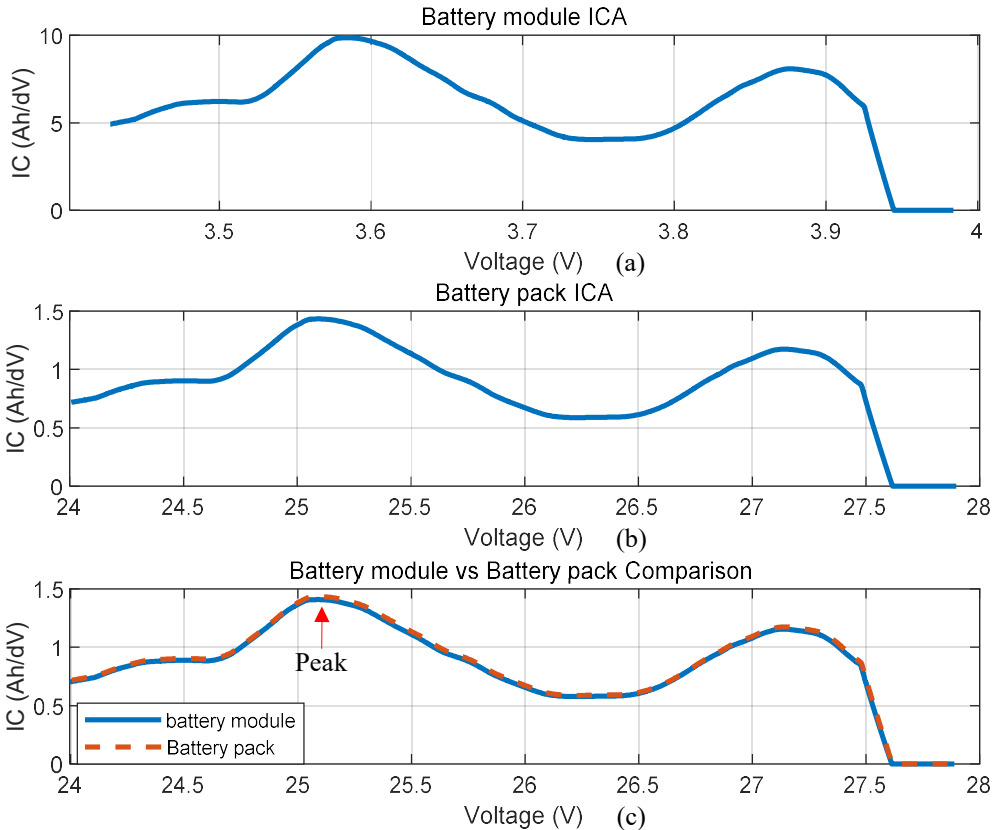


Figure 3.20 Voltage-IC curve according to internal resistance (a) Battery module IC curve, (b) Battery pack IC curve, (c) Battery module vs Battery pack IC curve comparison

배터리 셀 간 SOC 편차는 배터리 팩 내에서 발생할 수 있는 크기인 5% 수준으로 선정 하고 module #4의 SOC를 0%으로 설정한 다른 모듈들 대비 5% 크게 설정하고 충전하는 시뮬레이션을 진행하였다. 이때 배터리 모듈이 만충된 전압에 도달하면 충전을 종료하는 시뮬레이션을 수행하였다. Fig 3.21은 module #4의 SOC를 5% 증가시킨 후 충전 시뮬레이션 진행한 결과로 Fig 3.21 (a)는 module #1의 전압과 module #4의 전압을 나타낸다. Fig 3.21 (b)는 두 모듈의 전압편차를 나타낸 결과이고, Fig 3.21 (c)는 부하전류를 나타낸다. SOC 편차가 있는 모듈 간 전압 편차는 초기 SOC 0% Rest 구간에서 최대 160mV 수준의 전압 편차가 나타났고 평균적으로 45mV 수준의 전압 편차가 나타난다. 이러한 전압 편차 나타나는 결과로 증분용량을 도출하고 모듈 레벨에서의 배터리 팩 레벨로 확장한 증분용량 결과를 비교한다. Fig

3.22는 배터리 모듈과 팩에 대한 증분용량을 도출한 결과로 Fig 3.22 (a)는 SOC 편차가 없는 module #1과 SOC 5% 증가된 module #4의 IC curve를 나타낸 결과이다. SOC 0% 부터 시작되는 module #1의 초기 IC curve는 나타나지만, SOC 5% 부터 시작하는 module #4의 초기 IC curve는 나타나지 않는 특징을 가지고 있다. 중간영역에서는 동일한 IC curve가 나타나는 특징을 가지고 있다. 만충 구간에서는 module #4가 가장 먼저 만충지점에 도달하면서 충전을 종료하는 시점에 module #1의 경우 만충이 되지 않기 때문에 module #4의 IC curve만 나타나는 특징을 가지고 있다. Fig 3.22 (b)는 배터리 팩의 증분용량 IC curve를 나타낸다. Fig 3.22 (c)에서는 SOC 편차가 있는 각 모듈을 배터리 팩 레벨로 증분용량을 도출한 결과와 배터리 팩의 증분용량 결과를 비교한다. SOC 편차에 따라 Low SOC 지점과, High SOC 지점에서의 IC curve가 좌우로 이동되는 형태로 도출되고, 중간 영역에는 동일한 형태의 IC curve가 나타난다. 또한 용량에 대한 편차가 없기 때문에 각 IC peak의 크기는 동일하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 SOC 편차가 있는 경우라도 하위 시스템에서 상위 시스템으로 증분용량을 확장하여 사용 가능함을 알 수 있다.

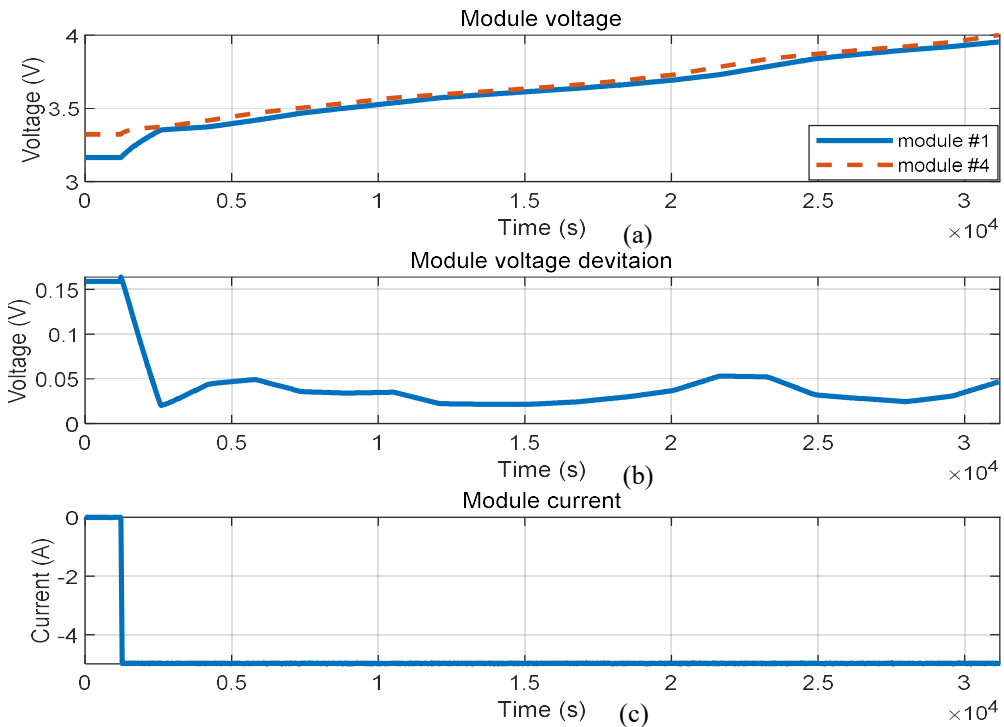


Figure 3.21 Simulation results in case of SOC difference, (a) module voltage, (b) module voltage deviation, (c) load current

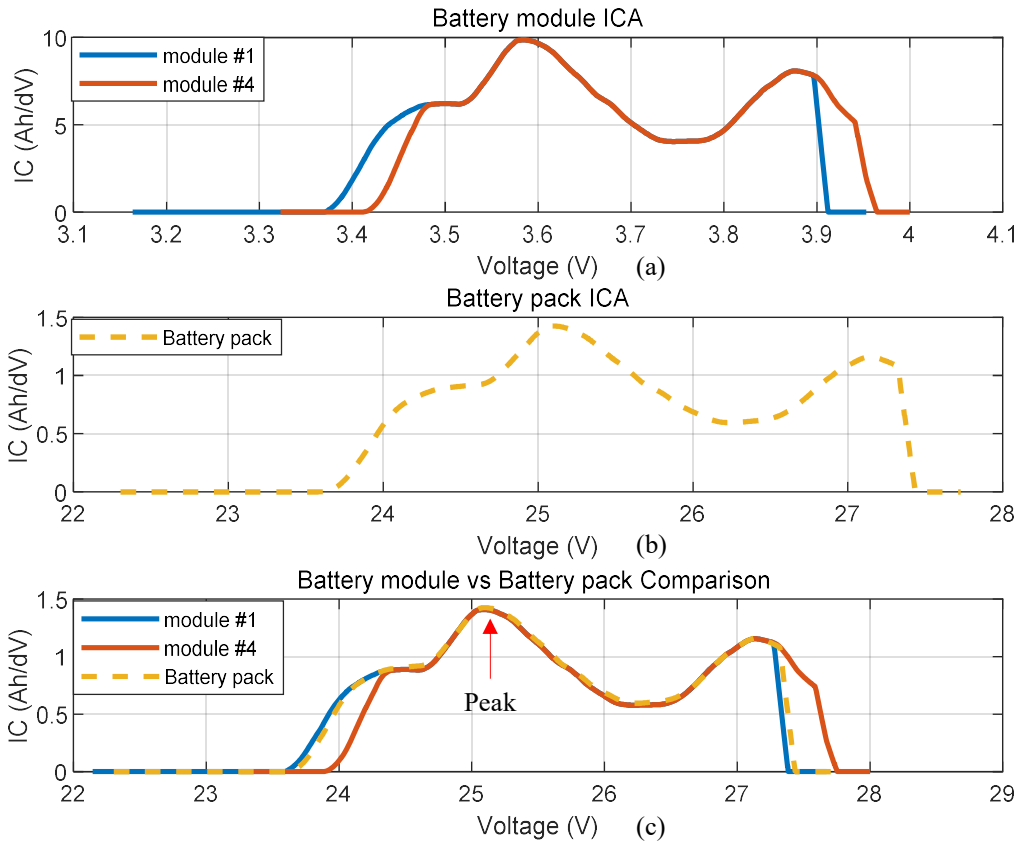


Figure 3.22 Voltage-IC curve according to SOC difference, (a) Battery module IC curve, (b) Battery pack IC curve, (c) Battery module vs Battery pack IC curve comparison

배터리 셀 간 용량 편차는 4% 수준으로 선정하고 module #4의 용량을 다른 모듈들 대비 4% 크게 설정하고 충전하는 시뮬레이션을 진행한다. 이때 배터리 모듈이 Cut-off voltage에 도달시 충전을 종료하는 시뮬레이션을 진행한다. Fig 3.23은 module #4의 용량을 4% 증가시킨 후 충전 시뮬레이션 진행한 결과이다. Fig 3.23 (a)는 module #1의 전압과 module #4의 전압을 나타내고, 두 모듈의 전압 편차를 Fig 3.23 (b)로 나타낸다. Fig 3.23 (c)는 부하전류를 나타낸다. 용량 편차가 있는 모듈 간 전압 편차는 만충구간에서 최대 40mV 수준 전압 편차가 나타났고 평균적으로 15mV 수준의 전압 편차가 나타난다. 이러한 결과로 증분용량을 도출하고 모듈 레벨에서의 배터리 팩 레벨로 확장한 증분용량 결과를 비교한다. Fig 3.24 (a)는 용량 편차가 없는 module #1과 용량이 4% 감소된 module #4의 IC curve를 나타낸 결과이다. 용량

이 작은 module #4의 IC curve가 module #1 IC curve 대비 수직적으로 전체적인 크기가 감소되는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 용량 편차가 있는 경우 IC curve 크기는 수직적으로 증감되고, 만충 구간에서의 IC curve의 확장 차이가 나타난다. Fig 3.24 (b)는 배터리 팩의 증분용량 IC curve를 나타낸다. Fig 3.24 (c)에서는 용량 편차가 있는 각 모듈을 배터리 팩 레벨로 증분용량을 도출한 결과와 배터리 팩의 증분용량 결과를 나타내고, 도출된 증분용량 IC 피크값과 피크값 오차를 Table 3.5에 정리하였다. 용량 편차가 없는 module #1로 상위레벨인 팩으로 확장시 1.05%의 피크값 오차가 거의 없음을 볼 수 있고 용량 편차가 있는 module #4로 상위레벨인 팩으로 확장시 4.99%의 오차가 도출된다.

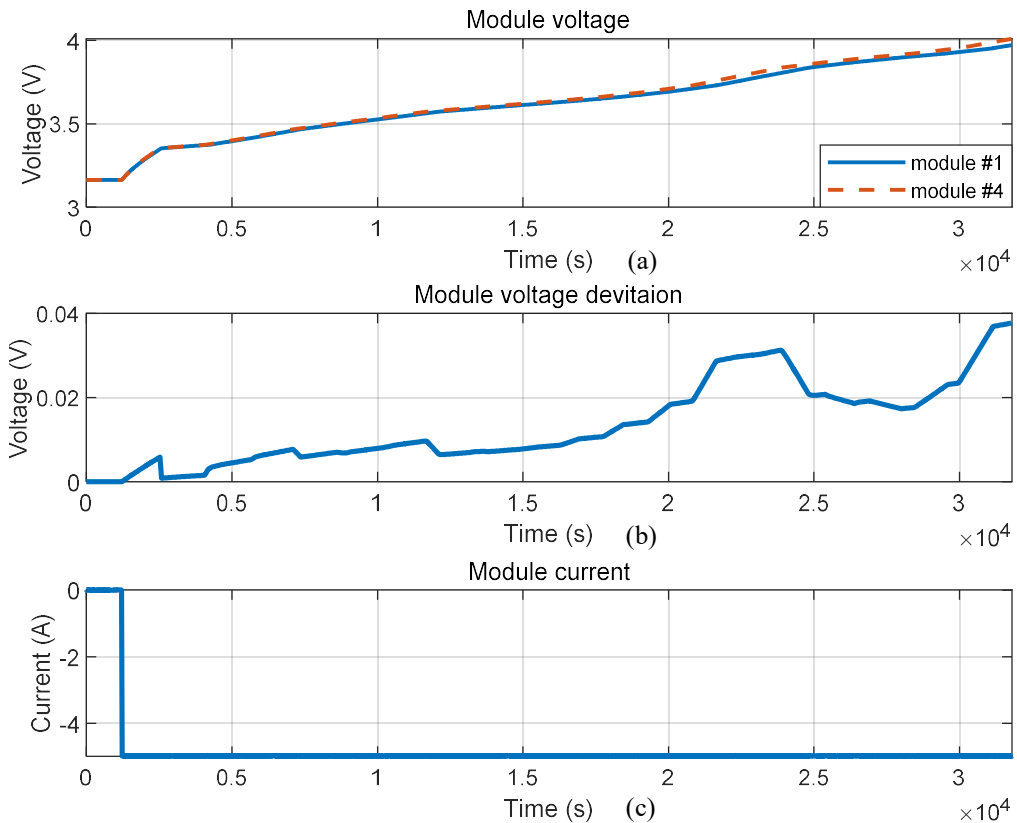


Figure 3.23 Simulation results in case of capacity difference, (a) module voltage, (b) module voltage deviation, (c) load current

Table 3.5 IC peak results according to battery capacity

	Pack	Module #1	Module #4
IC peak	1.423	1.408	1.352
Error rate	0%	1.05%	4.99%

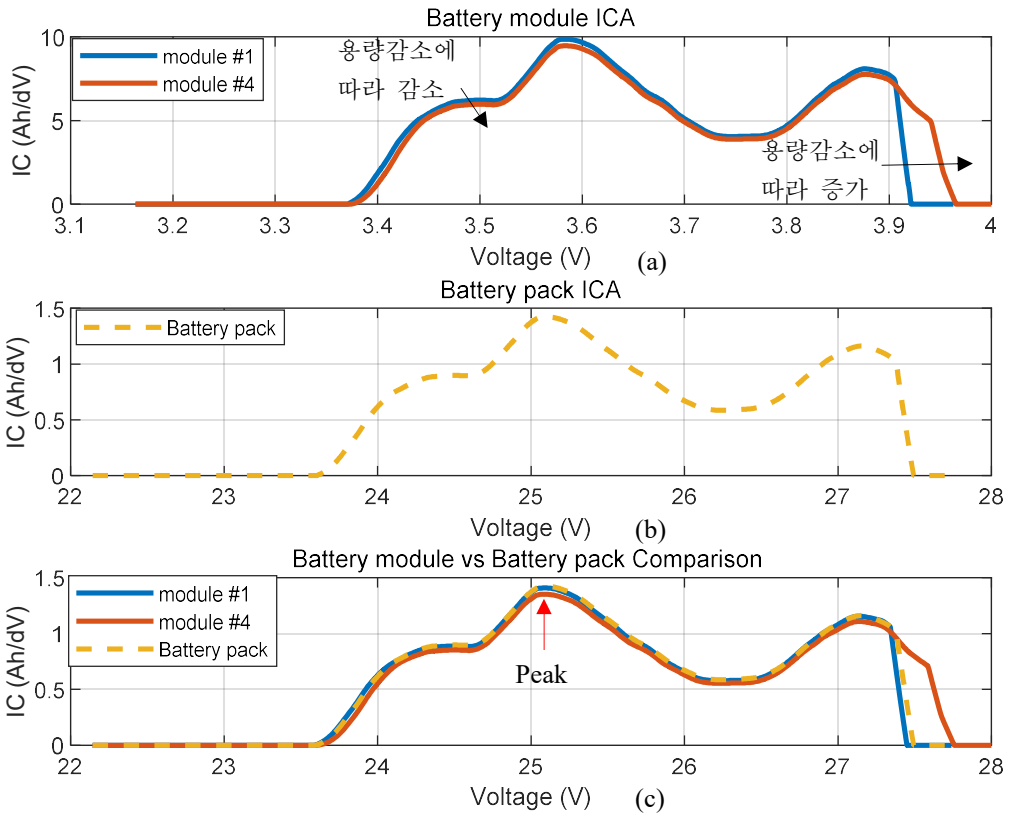


Figure 3.24 Voltage-IC curve according to capacity difference, (a) Battery module IC curve, (b) Battery pack IC curve, (c) Battery module vs Battery pack IC curve comparison

앞서 각각의 파라미터 편차만 적용하여 시뮬레이션한 결과를 도출하였고, 추가적으로 파라미터 편차를 복합적으로 적용된 조건에 대한 시뮬레이션을 진행한다. 실제적인 파라미터 편차를 나타내기 위해 1개의 모듈을 제외한 각 모듈에 파라미터 편차를 랜덤 적용한다. 배터리 내부 저항은 $\pm 10\%$, SOC는 $+3\%$, 용량은 $\pm 3\%$ 이내

랜덤 적용하여 시뮬레이션 진행한 결과를 Fig 3.25로 나타낼 수 있다. Fig 3.25 (a)는 파라미터 편차를 랜덤 적용한 경우의 각 모듈의 전압을 나타낸 결과로 각 모듈마다의 파라미터가 다르게 적용되어 충전 전압이 다르게 나타난다. Fig 3.25 (b)는 각 모듈의 최대 전압편차를 나타낸 결과로 SOC 0% Rest 구간에서 최대 74mV 전압 편차가 나타났고 평균적으로 23mV 수준의 전압 편차가 나타난다. 배터리 팩 내부 모듈의 정규화된 파라미터 설정값 및 각 모듈에 대한 IC 피크점을 Table 3.6으로 정리한다. Fig 3.26은 배터리 팩 IC curve과 배터리 모듈들의 평균 전압으로 계산한 IC curve를 배터리 팩 레벨로 확장한 결과를 나타낸다. 각각의 IC curve 비교 결과 배터리 팩의 IC 피크값은 1.423, 전체 모듈 평균 전압으로 도출한 IC 피크값은 1.4로 도출하고 이러한 피크값에 대한 추정 오차를 Table 3.7에 정리한다. 두 조건의 피크값 오차는 1.613% 수준으로 나타났고, 이를통해 모듈간 불균형이 있는 조건에서도 모듈의 평균전압으로 배터리 팩 확장시 배터리 팩 IC 피크값과 유사하게 나타낼 수 있음을 확인한다.

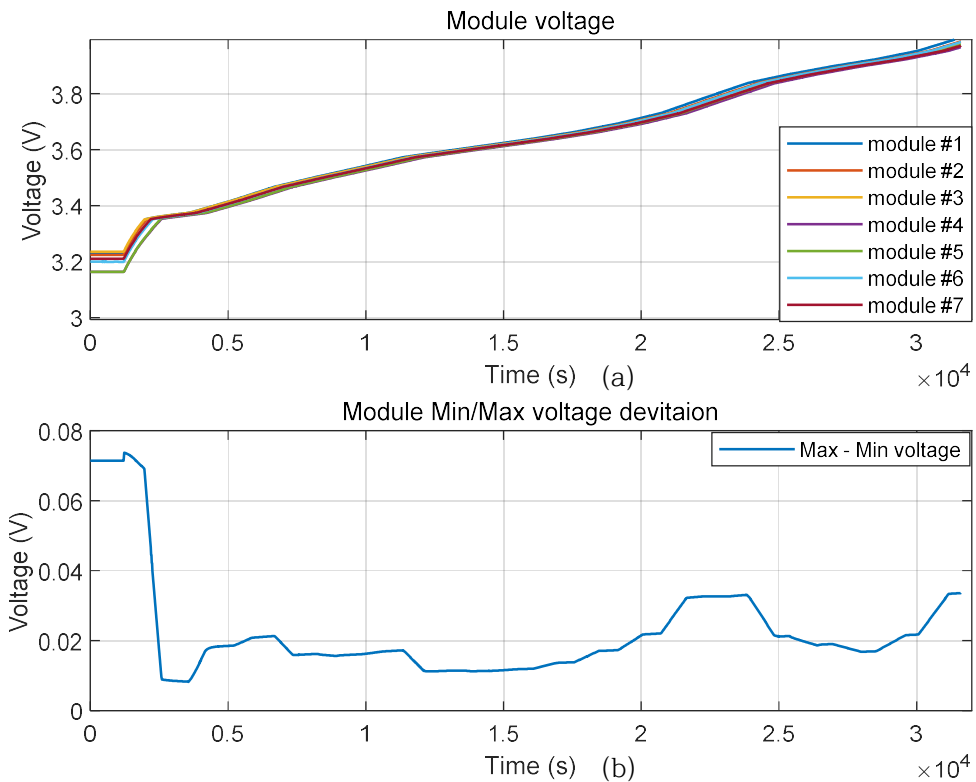


Figure 3.25 Simulation results in case of internal resistance/SOC/capacity difference, (a) module voltage, (b) module voltage deviation

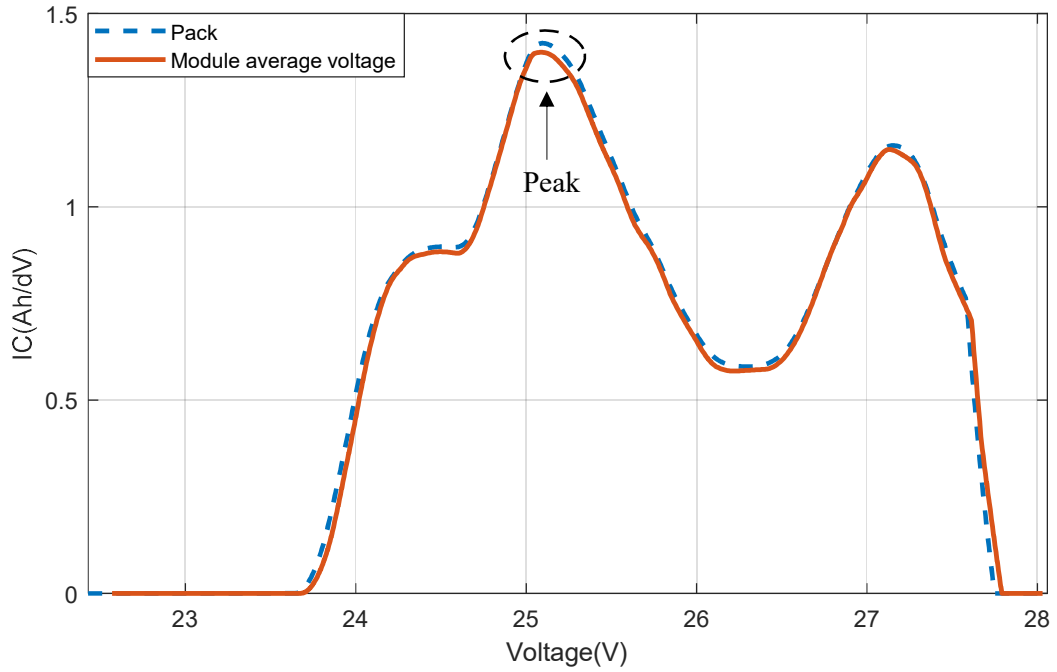


Figure 3.26 Voltage-IC curve according condition

Table 3.6 Battery module parameter difference and IC peak

	resistance	SOC	Capacity	Peak
module #1	1.034	1.018	0.982	9.695
module #2	0.980	1.017	0.995	9.797
module #3	1.027	1.020	1.006	9.929
module #4	1	1	1	9.856
module #5	1.051	1	0.970	9.584
module #6	0.983	1.010	0.990	9.749
module #7	1	1.013	1.018	10.03

Table 3.7 Peak estimation error

	Pack	Module voltage average
IC peak	1.423	1.4
Error rate	0%	1.613%

본 절에서는 배터리 셀의 증분용량 추정 성능에 대한 검증을 진행했다. IFR 26650-3400, INR 18650-29E, INR 21700-50S 배터리에 대한 추정 수식을 설계하여 용량을 추정하였다. 실험 결과와 추정 결과에 대한 오차를 결정계수(R-squared)로 나타내어 추정 성능을 확인하였다. 또한 배터리 팩 시뮬레이션 모델 설계하고 배터리 팩 내부 셀 간 파라미터 편차 조건을 모사하고 배터리 팩으로 확장하여 증분용량 추정 성능을 검증했다. 내부저항, SOC, 용량에 대한 파라미터 편차가 있는 조건에서의 증분용량 분석을 진행했고, 최종적으로 내부저항, SOC, 용량이 복합적으로 편차가 있는 조건에서 모듈 평균 전압 조건으로 확장하였다. 이를 통해 하위 시스템에서 상위 시스템으로 확장시 용량 간 불균형이 가장 큰 영향을 미치기 때문에 각 배터리 간 용량 관리가 된다면 하위 시스템에서 상위 시스템으로 증분용량을 확장하여 사용 가능하다.

3.2.3 증분용량을 적용한 실시간 배터리 팩 모의실험 결과

증분용량 분석법을 적용한 배터리 팩에서 실시간 용량추정이 가능한지 확인하기 위해 Matlab Simulink/Simscape 기반으로 검증을 진행한다. Fig 3.27은 배터리 팩 내부 모듈 간 평균 전압, 배터리 팩 전류를 입력으로 하는 증분용량 추정 코드를 적용하여 실시간적으로 배터리 팩 충전에 따른 IC값을 구하고 최대 IC Peak 값으로 용량을 도출하는 시뮬레이션 모델이다. Fig 3.28 (a)는 배터리 팩 내부 모듈의 평균 전압을 나타낸 결과이다. Fig 3.28 (b)는 모듈의 평균전압이 3.5V ~ 3.7V 구간에서 최대 IC 피크값을 도출한 결과로 최대 91.76의 피크값을 도출한다. 이를 통해 Fig 3.28 (c)와 같은 배터리 팩에 대한 용량시 배터리 팩의 용량은 42.75Ah로 나타났다. 이때 실제 배터리 팩 용량은 42.425Ah이며 실제 용량과 추정 용량에 대한 오차는 0.75% 수준으로 도출되어 시뮬레이션을 통해 실시간 용량 추정값에 대한 정확성을 검증하였다.

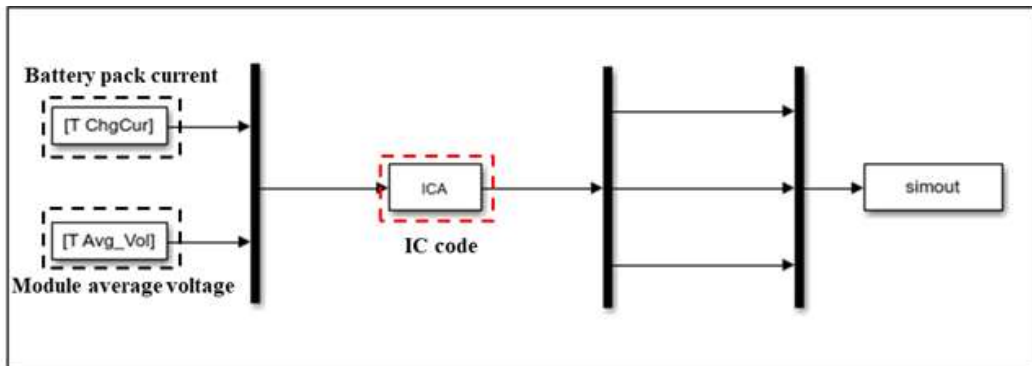


Figure 3.27 Real-time simulation model for incremental capacity verification

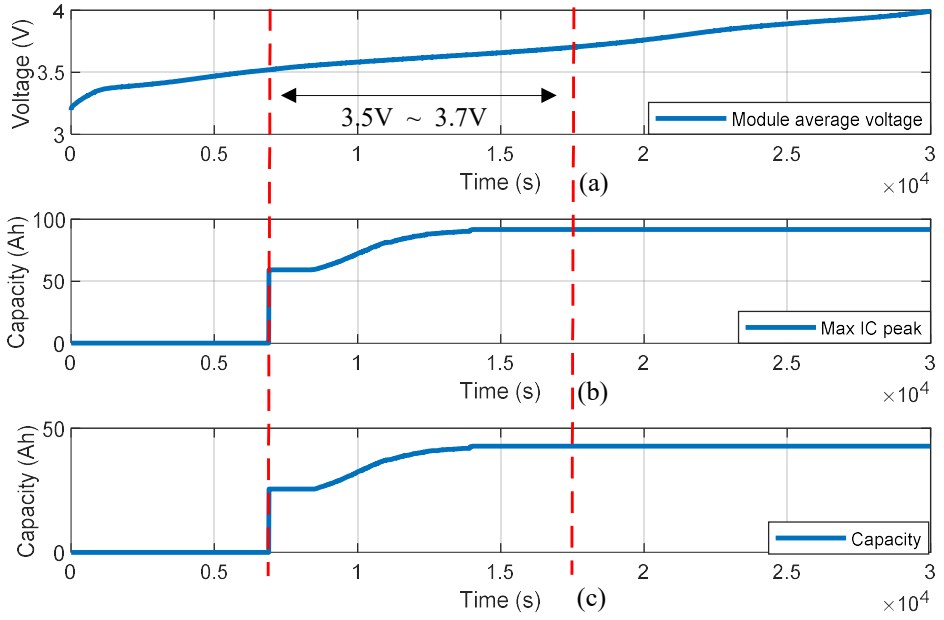


Figure 3.28 Real-time simulation results, (a) Module average voltage, (b) Max IC peak, (c) Capacity

제 4 장 결론

본 논문에서는 증분용량 분석법 기반 용량추정을 진행하기 위한 각 전압 특성이 다른 배터리 셀에서의 증분용량 인자인 특이점, 전압증가량 범위, 전류조건을 설계하는 연구를 진행했다. 증분용량 인자를 설계하기 위해 실험을 통해 전압 특성이 다른 배터리인 IFR 26650-3400, INR 18650-29E, INR 21700-50S를 선정하고 선정된 배터리에 대한 충방전 실험을 진행하였으며, Pearson 상관관계 분석을 통해 용량과의 상관관계가 높은 인자를 설계했다. 배터리 특이점의 경우 선정된 배터리들은 Peak #2 지점이 가장 용량과의 상관성이 높게 도출되어 Peak #2를 특이점으로 선정하였고, 전압 증가량 범위의 경우 IFR 26650-3400, INF 18650-29E, INR 21700-50S 배터리 순으로 70mV, 100mV, 20mV의 조건을 선정하였다. 전류 조건의 경우 충전 C-rate가 다른 운용조건에서 특이점이 다르게 나타나기 때문에 증분용량 알고리즘 설계시 각 배터리에 맞는 전류 조건을 선정하였다. 선정된 증분용량 인자를 적용하여 배터리 셀 별 용량추정을 진행하고 실제 배터리 셀의 용량과 비교하여 추정 오차를 비교했다. IFR 26650-3400 배터리의 경우 RMSE 0.05%, INR 18650-29E 배터리의 경우 RMSE 0.33%, INR 21700-50S 배터리의 경우 RMSE 0.4%의 추정 성능을 나타내었다.

이후 배터리 셀 레벨에서 진행되었던 연구를 배터리 팩 레벨로 확장하기 위해 배터리 팩 내부 직병렬된 셀의 개수와 IC값을 변수로 하는 배터리 팩에 대한 증분용량 수식을 설계하였다. 설계된 배터리 팩에 대한 증분용량 수식을 검증 하기위해 LIB-24-A 배터리 팩에 대한 충방전 실험을 진행하고, 배터리 팩 내부의 모듈로 확장하여 배터리 팩에 대한 용량추정을 진행하였다. 용량 추정시 RMSE 0.4%의 추정 성능을 검증하였다. 하지만 배터리 팩 내부 셀 간 불균형이 없거나 미미한 경우에만 배터리 팩에대한 증분용량 수식을 적용할 수 있기 때문에 셀 간 불균형이 나타나는 조건에의 거동 특성을 분석하고 하위 레벨에서 상위레벨로 확장 가능성을 제시한다. 파라미터 변동에 대한 영향성 분석을 위해 배터리 팩모델을 설계했고 모델의 정확도를 검증했다. 이후 배터리 팩 모델에 셀 간 불균형이 나타나는 조건을 모사하고 불균형 조건에 에서 시뮬레이션 분석을 통해 하위 시스템의 증분용량 결과를 상위 시스템으로 확장하여 용량 추정을 진행했다. 각각의 불균형의 원인이되는 파라미터 불균형이 나타나는 조건 중 용량에 대한 불균형이 나타나는 경우 상위 시스템으로

확장시 IC 피크값 오차 가장 크게 나타났기 때문에 배터리 팩 내부의 모듈 간 용량 관리할 필요가 있다. 이후 증분용량 분석법을 실제 배터리에 적용하여 실시간으로 용량추정 가능성을 검증하기 위해 시뮬레이션 모델 기반으로 실시간 시뮬레이션을 진행하였다. 그 결과 배터리 팩의 추정 용량은 42.75Ah로 나타났고 실제 배터리 팩 용량 42.425Ah 대비 0.75% 수준의 오차로 도출되어 시뮬레이션을 통한 실시간 용량 추정값에 대한 정확성을 검증하였다.

향후 연구에서는 현재 고려하지 않았던 다양한 온도 조건을 고려하여 증분용량 인자를 설계할 필요가 있으며 온도 조건에 따라 증분용량의 특성 변화에 대한 분석이 필요하다. 추가적으로 본 연구에서는 배터리 팩 내 셀 간 불균형이 없거나 미미한 조건에 대한 배터리 팩 레벨로 확장하는 증분용량 수식을 설계하였으나, 배터리 팩 노화에 따른 셀 간 불균형 및 온도 인자를 반영하여 배터리 팩의 실제적인 노화에 따른 용량에 대한 추정이 필요하다.

【참고문헌】

- [1] Energy Storage Systems Market (By Technology: Compressed Air, Pumped Hydro Storage, Lithium Ion, Sodium Sulphur, Lead Acid, Redox flow, Nickel Cadmium, Flywheel, By Application, Transportation, Grid Management; By End User: Residential, Non-Residential, Utilities) - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, Regional Outlook, and Forecast 2022 - 2030, <https://www.precedenceresearch.com/energy-storage-systems-market>
- [2] Peng, Jichang, Jinhao Meng, Dan Chen, Haitao Liu, Sipeng Hao, Xin Sui, and Xinghao Du. "A Review of Lithium-Ion Battery Capacity Estimation Methods for Onboard Battery Management Systems: Recent Progress and Perspectives." *Batteries* 8, no. 11 (2022): 229.
- [3] Lin, Mingqiang, Denggao Wu, Jinhao Meng, Ji Wu, and Haitao Wu. "A Multi-Feature-Based Multi-Model Fusion Method for State of Health Estimation of Lithium-Ion Batteries." *Journal of Power Sources* 518 (2022): 230774.
- [4] Tang, Xiaopeng, Kailong Liu, Jingyi Lu, Boyang Liu, Xin Wang, and Furong Gao. "Battery Incremental Capacity Curve Extraction by a Two-Dimensional Luenberger - Gaussian-Moving-Average Filter." *Applied Energy* 280 (2020): 115895.
- [5] Feng, Xuning, Caihao Weng, Xiangming He, Li Wang, Dongsheng Ren, Languan Lu, Xuebing Han, and Minggao Ouyang. "Incremental Capacity Analysis on Commercial Lithium-Ion Batteries Using Support Vector Regression: A Parametric Study." *Energies* 11, no. 9 (2018): 2323.
- [6] Li, Xiaoyu, Changgui Yuan, Xiaohui Li, and Zhenpo Wang. "State of Health Estimation for Li-Ion Battery Using Incremental Capacity Analysis and Gaussian Process Regression." *Energy* 190 (2020): 116467.

- [7] Jiang, Bo, Haifeng Dai, and Xuezhe Wei. "Incremental Capacity Analysis Based Adaptive Capacity Estimation for Lithium-Ion Battery Considering Charging Condition." *Applied Energy* 269 (2020): 115074.
- [8] Bloom, Ira, Andrew N Jansen, Daniel P Abraham, Jamie Knuth, Scott A Jones, Vincent S Battaglia, and Gary L Henriksen. "Differential Voltage Analyses of High-Power, Lithium-Ion Cells: 1. Technique and Application." *Journal of Power Sources* 139, no. 1-2 (2005): 295-303.
- [9] Wu, Billy, Vladimir Yufit, Yu Merla, Ricardo F Martinez-Botas, Nigel P Brandon, and Gregory J Offer. "Differential Thermal Voltammetry for Tracking of Degradation in Lithium-Ion Batteries." *Journal of power sources* 273 (2015): 495-501.
- [10] Deng, Zhaofeng, Zhian Zhang, Yanqing Lai, Jin Liu, Jie Li, and Yexiang Liu. "Electrochemical Impedance Spectroscopy Study of a Lithium/Sulfur Battery: Modeling and Analysis of Capacity Fading." *Journal of The Electrochemical Society* 160, no. 4 (2013): A553.
- [11] Rahmoun, Ahmad, Helmuth Biechl, and Argo Rosin. "Soc Estimation for Li-Ion Batteries Based on Equivalent Circuit Diagrams and the Application of a Kalman Filter." Paper presented at the 2012 Electric Power Quality and Supply Reliability, 2012.
- [12] Hu, Chao, Byeng D Youn, and Jaesik Chung. "A Multiscale Framework with Extended Kalman Filter for Lithium-Ion Battery Soc and Capacity Estimation." *Applied Energy* 92 (2012): 694-704.
- [13] Plett, Gregory L. "Sigma-Point Kalman Filtering for Battery Management Systems of Lipb-Based Hev Battery Packs: Part 2: Simultaneous State and Parameter Est

- imation." *Journal of power sources* 161, no. 2 (2006): 1369-84.
- [14] Hao, Xiongbo, and Jian Wu. "Online State Estimation Using Particles Filters of Lithium-Ion Polymer Battery Packs for Electric Vehicle." Paper presented at the 2015 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2015.
- [15] Zhao, Fen, Penghua Li, Yinguo Li, and Yuanyuan Li. "The Li-Ion Battery State of Charge Prediction of Electric Vehicle Using Deep Neural Network." Paper presented at the 2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC), 2019.
- [16] Li, Yihuan, Kang Li, Xuan Liu, Yanxia Wang, and Li Zhang. "Lithium-Ion Battery Capacity Estimation—a Pruned Convolutional Neural Network Approach Assisted with Transfer Learning." *Applied Energy* 285 (2021): 116410.
- [17] Lei, Xiao, CC Chan, Kaipei Liu, and Li Ma. "Pruning Ls-Svm Based Battery Model for Electric Vehicles." Paper presented at the Third International Conference on Natural Computation (ICNC 2007), 2007.
- [18] Deng, Zhongwei, Lin Yang, Yishan Cai, and Hao Deng. "Maximum Available Capacity and Energy Estimation Based on Support Vector Machine Regression for Lithium-Ion Battery." *Energy Procedia* 107 (2017): 68-75.
- [19] Fan, Yaxiang, Fei Xiao, Chaoran Li, Guorun Yang, and Xin Tang. "A Novel Deep Learning Framework for State of Health Estimation of Lithium-Ion Battery." *Journal of Energy Storage* 32 (2020): 101741.
- [20] Jiang, Yan, Jiuchun Jiang, Caiping Zhang, Weige Zhang, Yang Gao, and Na Li. "State of Health Estimation of Second-Life Lifepo4 Batteries for Energy Storage Applications." *Journal of cleaner production* 205 (2018): 754-62.

- [21] Han, Xuebing, Mingguo Ouyang, Languang Lu, and Jianqiu Li. "Cycle Life of Commercial Lithium-Ion Batteries with Lithium Titanium Oxide Anodes in Electric Vehicles." *Energies* 7, no. 8 (2014): 4895-909.
- [22] Li, Yi, Mohamed Abdel-Monem, Rahul Gopalakrishnan, Maitane Bercibar, Elise Nanini-Maury, Noshin Omar, Peter van den Bossche, and Joeri Van Mierlo. "A Quick on-Line State of Health Estimation Method for Li-Ion Battery with Incremental Capacity Curves Processed by Gaussian Filter." *Journal of Power Sources* 373 (2018): 40-53.
- [23] She, Chengqi, Lei Zhang, Zhenpo Wang, Fengchun Sun, Peng Liu, and Chunbao Song. "Battery State of Health Estimation Based on Incremental Capacity Analysis Method: Synthesizing from Cell-Level Test to Real-World Application." *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics* (2021).
- [24] Dubarry, Matthieu, Cyril Truchot, and Bor Yann Liaw. "Synthesize Battery Degradation Modes Via a Diagnostic and Prognostic Model." *Journal of power sources* 219 (2012): 204-16.
- [25] Pastor-Fernández, Carlos, Kotub Uddin, Gael H Chouchelamane, W Dhammika Widanage, and James Marco. "A Comparison between Electrochemical Impedance Spectroscopy and Incremental Capacity-Differential Voltage as Li-Ion Diagnostic Techniques to Identify and Quantify the Effects of Degradation Modes within Battery Management Systems." *Journal of Power Sources* 360 (2017): 301-18.
- [26] Vetter, Jens, Petr Novák, Markus Robert Wagner, Claudia Veit, K-C Möller, JO Besenhard, Martin Winter, et al. "Ageing Mechanisms in Lithium-Ion Batteries." *Journal of power sources* 147, no. 1-2 (2005): 269-81.
- [27] Han, Xuebing, Mingguo Ouyang, Languang Lu, Jianqiu Li, Yuejiu Zheng, and Z

- he Li. "A Comparative Study of Commercial Lithium Ion Battery Cycle Life in Electrical Vehicle: Aging Mechanism Identification." *Journal of power sources* 251 (2014): 38-54.
- [28] Chok, Nian Shong. "Pearson's Versus Spearman's and Kendall's Correlation Coefficients for Continuous Data." University of Pittsburgh, 2010.
- [29] 박성윤, 이평연, 유기수, 김종훈. "증분용량 및 차동전압 분석법을 이용한 리튬이온 배터리 SOH 추정 방법 연구." *대한기계학회 논문집 A권* 45, no. 3 (2021): 259-266, 10.3795/KSME-A.2021.45.3.259
- [30] Meng, Jinhao, Guangzhao Luo, Mattia Ricco, Maciej Swierczynski, Daniel-Ioan Stroe, and Remus Teodorescu. "Overview of Lithium-Ion Battery Modeling Methods for State-of-Charge Estimation in Electrical Vehicles." *Applied sciences* 8, no. 5 (2018): 659.
- [31] Windarko, Novie Ayub, and Jae-Ho Choi. "Soc Estimation Based on Ocv for Nih Batteries Using an Improved Takacs Model." *Journal of Power Electronics* 10, no. 2 (2010): 181-86.
- [32] Miniguano, Henry, Andrés Barrado, Antonio Lázaro, Pablo Zumel, and Cristina Fernández. "General Parameter Identification Procedure and Comparative Study of Li-Ion Battery Models." *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 69, no. 1 (2019): 235-45.
- [33] Zhang, Lijun, Hui Peng, Zhansheng Ning, Zhongqiang Mu, and Changyan Sun. "Comparative Research on Rc Equivalent Circuit Models for Lithium-Ion Batteries of Electric Vehicles." *Applied Sciences* 7, no. 10 (2017): 1002.