

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2024.24.2.133>  
JIIBC 2024-2-20

# 리튬이온 배터리 동특성 및 안전성 평가를 위한 배터리 시뮬레이터 시험설비

## Test Facility of Battery Simulator for Dynamic Characteristics and Safety Evaluation in Lithium-ion Battery

정성인\*, 윤용호\*\*

Sungin Jeong\*, Yongho Yoon\*\*

**요약** 리튬이온 배터리는 높은 에너지 밀도 빠른 충전조건 긴 사이클수명의 특성으로 여러 분야에서 사용되고 있다. 하지만 리튬이온 배터리는 과충전, 과방전, 물리적손상, 고온에서의 사용은 배터리 수명 감소와 보호회로 손상에 의한 화재 및 폭발에 의한 인명피해를 입힐 수 있다. 이러한 배터리의 위험성을 낮추며 배터리 성능을 향상시키기 위해서는 충전 및 방전 과정에서의 특성들을 분석하고 이해하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 배터리 충전방전기와 시뮬레이터를 활용하여 리튬이온 배터리의 충전 및 방전 특성을 분석하여 과충전 과방전에 따른 배터리 수명 감소와 보호회로 손상에 의한 화재 및 폭발에 의한 인명피해를 줄이고자 한다.

**Abstract** Lithium-ion batteries are used in many fields due to their high energy density, fast charging conditions, and long cycle life. However, overcharging, over-discharging, physical damage, and use of lithium-ion batteries at high temperatures can reduce battery life and cause damage to people due to fire or explosion due to damage to the protection circuit. In order to reduce the risk of these batteries and improve battery performance, the characteristics of the charging and discharging process must be analyzed and understood. Therefore, in this paper, we analyze the charging and discharging characteristics of lithium-ion batteries using a battery charger and discharger and simulator to reduce the risk of loss of life due to overcharge and overdischarge, as well as casualties from fire and explosion due to damage to the protection circuit.

**Key Words** : Lithium-ion Batteries, Battery Simulator Test Facility, Safety Evaluation, Battery Performance

### 1. 서 론

현대 사회에서 전기 에너지 저장용 신재생에너지 시스템, 이동통신 기기, 전기 자동차 등 다양한 분야에서 핵

심기술로 사용된다. 특히 리튬이온 배터리는 높은 에너지 밀도 빠른 충전 조건 긴 사이클수명의 특성으로 여러 분야에서 사용되고 있다. 하지만 리튬이온 배터리는 과충전, 과방전, 물리적손상, 고온에서의 사용은 배터리 수

\*정회원, 광주대학교 전기공학과

\*\*정회원, 광주대학교 전기공학과

접수일자 2024년 2월 1일, 수정완료 2024년 3월 1일

게재확정일자 2024년 4월 5일

Received: 1 February, 2024 / Revised: 1 March, 2024 /

Accepted: 5 April, 2024

\*\*Corresponding Author: yhyoon@gwangju.ac.kr

Department of Electrical Engineering, Gwangju University, Gwangju, Korea

명감소와 보호회로 손상에 의한 화재 및 폭발로 인한 인명피해를 입힐 수 있다<sup>[1]</sup>. 이러한 배터리의 위험성을 낮추며 배터리 성능을 향상시키기 위해서는 충전 및 방전 과정에서의 특성들을 분석하고 이해하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 배터리 충방전기와 시뮬레이터를 활용하여 리튬이온 배터리의 충전 및 방전 특성을 분석하여 과충전 과방전에 따른 배터리 수명감소와 보호회로 손상에 의한 화재 및 폭발로 인한 인명피해를 줄이고자 한다.

## II. 리튬이온 배터리 성능분석을 위한 시험설비

배터리를 제조하는 기술 발전으로 이차전지 배터리의 크기는 점점 작아지면서 효율성이 높아지고 있다. 따라서 이러한 기술개발 속도에 맞춰 이차전지 배터리 성능 시험은 특성, 수명, 고장진단, 재활용 등의 다양한 시험 방법을 요구하고 있다. 또한 배터리의 안전과 적절한 기능을 보장하기 위한 배터리 테스트 시스템 구축과 이에 따른 지침 및 올바른 기본지식이 고려되고 있다<sup>[2]</sup>. 따라서 본 논문에서는 리튬이온 배터리의 충·방전에 따른 성능을 분석하기 위해 배터리 테스트 시스템을 다음의 내용들로 구성하였다.

### 1. 리튬이온 배터리 성능분석을 위한 소프트웨어 시험설비<sup>[3]</sup>

소프트웨어 시험설비는 배터리 전용 양방향 DC 전원 공급장치와 실제 리튬이온 배터리를 가상화한 배터리 시뮬레이터를 이용하여 구성하였다.

#### 가. 배터리 전용 양방향 DC 전원공급장치

리튬이온 배터리에 대해 일정시간 충·방전에 따른 배터리의 응답특성과 방전진행+방전정지(방전전류 on+방전전류 off)를 반복 시 다이내믹 특성을 살펴보아야 한다. 또한 과도한 충·방전에 따른 배터리의 수명감소와 손상을 방지하기 위해 제어할 수 있는 배터리 충·방전기가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 리튬이온 배터리 성능분석을 위해 Elektro-Automatik에서 제작한 배터리 전용 양방향 DC 전원공급장치(EA-PSB 9360-40)를 충·방전기로 사용하였다.

리튬이온 배터리는 그림 1처럼 충전 시 전류는 일정하게 흐르면서 전압이 증가하면서 충전이 진행된다. 이후

충전전압에 도달하게 되면 배터리의 과충전을 방지하기 위하여 충전전압은 일정하면서 전류가 감소하여 종지전류에서 종료하는 정전류/정전압 (Constant Current/Constant Voltage, CC/CV) 방식으로 충전된다<sup>[6]</sup>. 따라서 배터리 전용 양방향 DC 전원공급장치를 이용하여 리튬이온 배터리를 충전하기 위해 충전전류, 충전전압, 충전종지전류를 그림 4(a)와 같이 설정할 수 있다.

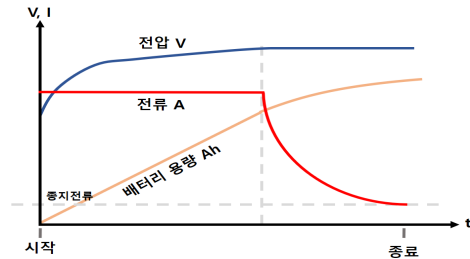


그림 1. 리튬이온 배터리의 충전 특성  
Fig. 1. Charging characteristics of lithium-ion batteries

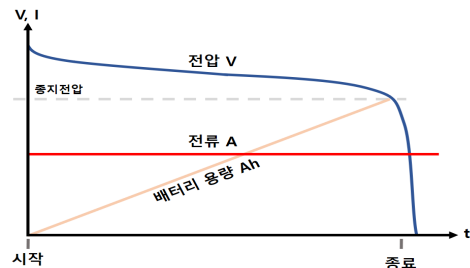


그림 2. 리튬이온 배터리의 방전 특성  
Fig. 2. Discharge characteristics of lithium-ion batteries

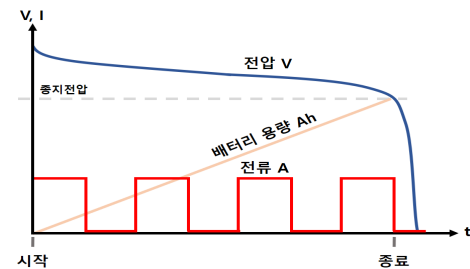


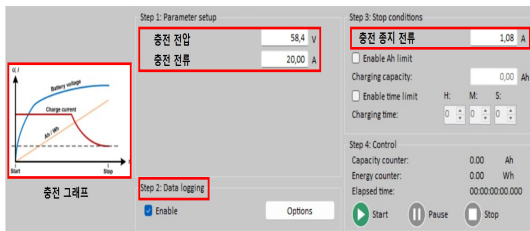
그림 3. 다이내믹 방전 시 리튬이온 배터리 방전 특성  
Fig. 3. Lithium-ion battery discharge characteristics during dynamic discharge

리튬이온 배터리의 방전은 그림 2와 같이 설정한 방전 전류의 정전류(Constant Current, CC) 값을 방전 종료 때까지 계속 유지하면서 시간에 따라 배터리 전압이 감소하는 특성이 있다. 또한 설정한 방전종지전압(cut-off)

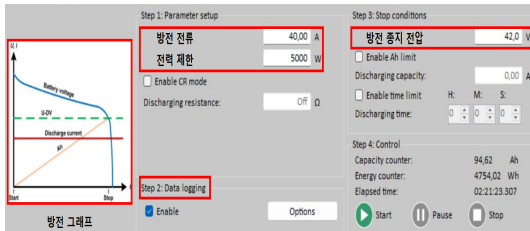
값에 도달 시 정전류로 흐르던 방전전류가 0A가 됨으로써 방전이 종료된다. 따라서 일정한 전류를 지속해서 정전류(CC)로 방전하는 특성을 바탕으로 리튬이온 배터리를 방전시키기 위한 조건으로 방전전류, 방전종지전압, 전력 제한값들을 그림 4(b)와 같이 설정할 수 있다.

그림 3은 설정한 방전전류를 방전진행 시간동안 0.5 duty 값을 가지면서 방전진행+방전정지(방전전류 on + 방전전류 off)가 반복되는 다이내믹 방전 시 리튬이온 배터리 방전 특성을 보여주고 있다. 따라서 이러한 스트레스성 실험조건을 통해 시험품인 리튬이온 배터리와 BMS의 신뢰성과 안전성의 정도를 확인할 수 있다.

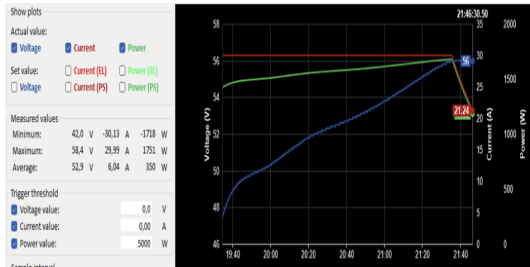
그림 4(c)는 충·방전시 배터리의 전압, 전류, 전력, 배터리 용량에 대한 실시간 상태정보들을 그래프로 보여주고 있으며 데이터 저장을 통해 배터리의 충·방전에 따른 특성을 시간축 개념에서 자세히 분석할 수 있다.



(a) 배터리 충전



(b) 배터리 방전



(c) 배터리 충·방전에 따른 상태정보

그림 4. 배터리 전용 양방향 DC 전원공급장치를 이용한 리튬이온 충방전

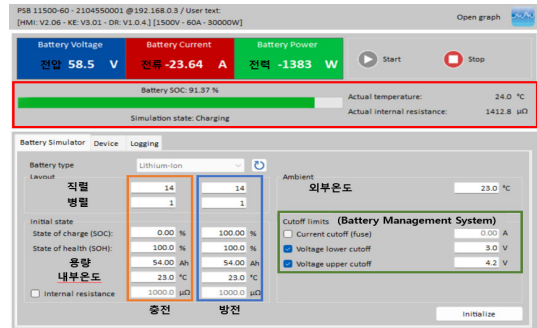
Fig. 4. Lithium-ion charging and discharging using a battery-specific bidirectional DC power supply

### 나. 리튬이온 배터리 시뮬레이터<sup>[4,5]</sup>

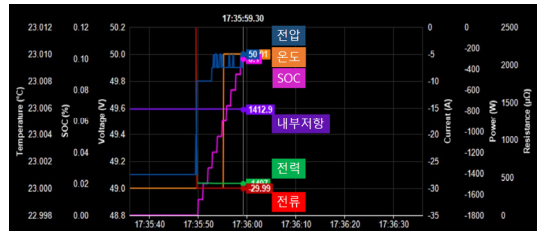
배터리를 가상화하여 소프트웨어로 구성된 리튬이온 배터리 시뮬레이터는 Elektro-Automatik에서 제작한 EA-PSB 11500-60을 사용하였다.

그림 5(a)는 리튬이온 배터리 시뮬레이터를 이용하여 배터리의 충·방전실험을 하기 위한 프로그램으로 시험품(리튬이온 배터리)의 시험조건을 입력할 수 있다. 따라서 배터리의 충전상태(SOC, State Of Charge), 성능수준(SOH, State of Health), 배터리의 직병렬 구조, 용량, 온도 등의 세부 정보들을 충전 또는 방전 시 필요로 한다. 또한 시뮬레이터의 프로그램상에서 Cut-off limits는 실제 리튬이온 배터리 내부에 설치된 BMS(Battery Manage System)의 역할을 하므로 각 셀당 허용전압을 설정하여 범위 이외의 전압은 차단하는 형식으로 동작이 된다.

그림 5(b)는 리튬이온 배터리 시뮬레이터를 이용하여 그림 5(a)에서 나타낸 소프트웨어 프로그램을 통해 입력한 데이터값들을 기준으로 충·방전 진행 시 실시간으로 배터리의 전압, 전류, 전력, 온도, SOC, 내부저항에 대한 상태정보를 보여주고 있다. 따라서 시험설비에서 사용된 배터리 전용 양방향 DC 전원공급장치를 통해 충·방전 진행 시 배터리의 상태정보를 소프트웨어 시험설비에서 동일한 내용으로 확인할 수 있다.



(a) 소프트웨어 프로그램



(b) 배터리 충·방전에 따른 상태정보

그림 5. 리튬이온 배터리 시뮬레이터 프로그램 및 배터리 상태 정보

Fig. 5. Lithium-ion battery simulator program and battery status information

다. 소프트웨어 시험설비 구성

배터리를 가상화하여 소프트웨어로 구성된 리튬이온 배터리 시뮬레이터를 이용하여 시나리오별로 충·방전 실험을 하기 위하여 그림 6과 같이 시험설비를 구성하였다.

충전시 배터리 전용 양방향 DC 전원공급장치에서 설정한 입력에너지는 소프트웨어로 구성된 리튬이온 배터리 시뮬레이터로 전달된다. 따라서 에너지 전달로 인한 순환이 이루어져야 하므로 내부적으로 구성된 DC-AC 인버터를 통해 다시 계통으로 회생하는 구조로 되어있다. 반면에 방전시 리튬이온 배터리 시뮬레이터에는 실제 저장된 충전에너지가 존재하지 않기에 계통으로부터 DC-AC 인버터, DC-DC 컨버터를 거쳐 전력 변환된 충전전압이 생성된다. 그리고 생성된 충전전압은 배터리 전용 양방향 DC 전원공급장치를 통해 다시 계통으로 방전하여 에너지가 회생하는 구조로 동작이 된다.

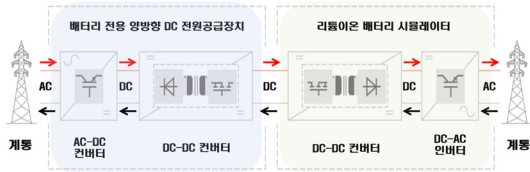


그림 6. 리튬이온 배터리 시뮬레이터를 이용한 소프트웨어 시험 장비 구성  
Fig. 6. Configuration of software test equipment using lithium-ion battery simulator

III. 소프트웨어 시험설비를 이용한 리튬이온 배터리 성능분석 실험결과

1. 시험품 리튬이온 배터리 시뮬레이터 사양

표 1. 리튬이온 배터리 시뮬레이터 사양  
Table 1. Lithium-ion battery simulator specifications

Parameter	Value
전지형식 (Battery Type)	14S(Serial, 직렬) Li-ion
공칭전압 (Nominal voltage)	50.4V(3.0~4.2V per cell)
공칭용량 (Nominal Capacity)	54Ah
표준충전조건 (0.5C) (Standard Charging Condition)	58.4V±1%, 27A, CC-CV End current : 1.08A(0.02C)
최대충전조건 (1C) (Max Charging Condition)	58.4V±1%, 54A, CC-CV End current : 1.08A(0.02C)
표준방전전류 (0.5C) (Standard Discharge Current)	27A
최대방전전류 (0.74C) (Max Discharging Current)	40A
방전중지전압 (Discharge Cut-off Voltage)	42.0V(3.0V per cell)

표 1은 소프트웨어 시험설비를 이용하여 시험품인 리튬이온 배터리 시뮬레이터의 사양을 보여주고 있다. 각 셀당 전압은 3.0~4.2V로 총 14개의 배터리가 직렬 구조로 42.0V~58.8V의 전압 범위에서 공칭전압은 50.4V값을 가진다. 그리고 C-rate(Current rate, 충전전속도)에 영향을 미치는 공칭용량, 표준충방전조건, 최대충전조건, 표준방전전류, 최대방전전류 등의 세부 정보들을 확인할 수 있다.

2 시험품 리튬이온 배터리 시뮬레이터 충전 시<sup>[6.7]</sup>

표 3의 특성이 있는 시험품 리튬이온 배터리 시뮬레이터에 대해 구축한 소프트웨어 시험설비를 이용하여 그림 7과 같이 충전실험을 통해 배터리 시뮬레이터의 특성을 살펴보았다.

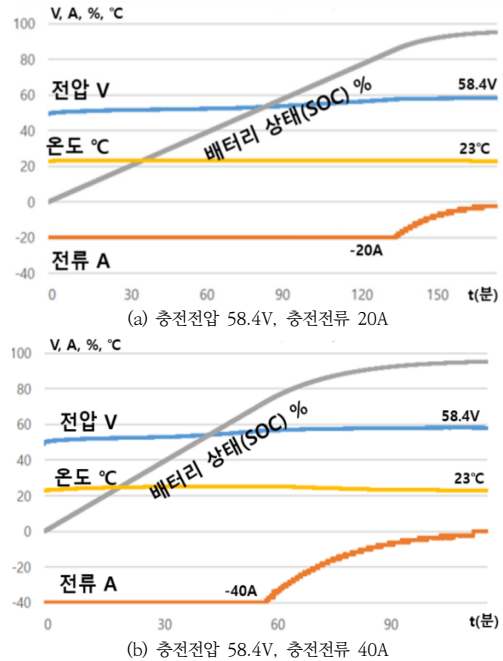


그림 7. 리튬이온 배터리 충전실험  
Fig. 7. Lithium-ion battery simulator charging experiment

그림 7(a)는 충전전압 58.4V, 충전전류 20A, 그리고 그림 7(b)는 충전전압 58.4V, 충전전류 40A로 설정 시 배터리 시뮬레이터의 상태(SOC), 충전전압, 충전전류 그리고 배터리 내부온도에 대한 각 그래프를 시간축 기준으로 결과의 그래프를 보여주고 있다.

충전전압 58.4V, 충전전류 20A, 그리고 그림 9(b)는 충전전압 58.4V, 충전전류 40A로 설정 시 배터리 상태(SOC), 충전전압, 충전전류에 대한 각 그래프를 시간축 기준으로 결과의 그래프를 보여주고 있다. 표준충전전압 58.4V에 대해 충전전류를 20A, 40A로 각각 달리 충전할 경우 공칭용량 54Ah에 대해 배터리 시뮬레이터 상태(SOC)는 대략 95% 값이 측정되었다. 이러한 결과로부터 배터리 시뮬레이터도 과충전으로 인한 배터리의 수명 감소와 손상을 방지하기 위하여 충전제어가 동작하고 있음을 알 수 있다. 또한 표 1에서 열거한 내용 중 표준충전 조건(0.5C)에 의해 20A, 40A로 각각 충전 시 충전시간은 대략 180분, 120분의 시간이 소요되어 0.37C, 0.69C의 충방전속도를 각각 실험 결과에서 보여주고 있다. 그리고 충전이 진행되는 동안 배터리 시뮬레이터 내부의 온도는 최초의 시작 온도에서 증가하여 대략 23°C로 일정한 값을 유지하고 있다.

### 3. 시험품 리튬이온 배터리 시뮬레이터 방전 시

2.2절에서 수행한 리튬이온 배터리 시뮬레이터의 최대충전전압 58.4V, 공칭용량 54Ah로 완전충전된 상태에서 방전전류를 20A, 40A로 설정하여 그림 12와 같이 방전실험을 하였다. 따라서 그림 8(a), 8(b) 모두 설정한 방전전류의 CC 모드로 방전이 이루어지면서 표 1에서 나타낸 방전종지전압 42.0V에서 방전이 종료되었다. 따라서 충전실험 때와 동일하게 배터리의 완전방전이 방지되고 있으며 내부 온도 변화 역시 충전 때와 비슷한 결과를 나타내고 있다. 그리고 SOC가 0%가 되는데 걸리는 방전시간이 대략 150분, 60분 정도로 용량에 따른 방전시간이 유사한 경향을 보인다.

그림 9는 그림 4에서 설명한 다이내믹 방전 시 리튬이온 배터리 방전 특성의 결과를 보여주고 있다. 방전진행(30초)+방전정지(30초)의 주기를 가지고 있는 20A 방전전류 on시 배터리 시뮬레이터 충전전압과 내부저항의 전압이 발생하는 부하상태 구간을 확인할 수 있다. 또한 방전전류 off시 배터리 시뮬레이터 충전전압만 단자전압으로 측정되는 무부하상태 구간을 확인할 수 있다. 이로써 시험장비를 이용하여 리튬이온 배터리의 다이내믹 방전실험 결과와 동일한 특성을 소프트웨어 시험장비에서도 경향을 찾아볼 수 있다.

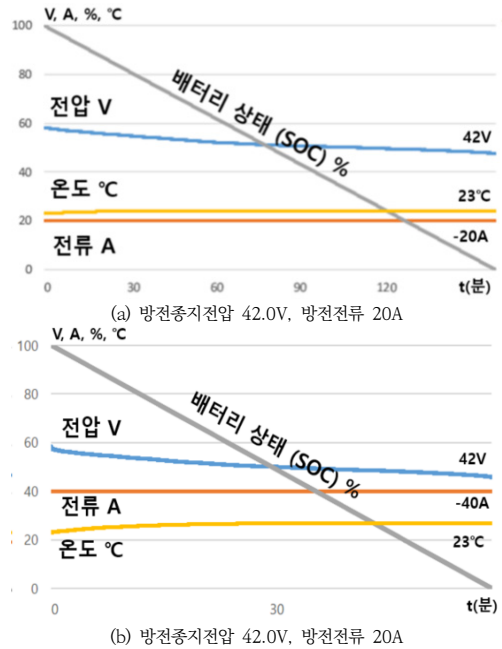


그림 8. 리튬이온 배터리 시뮬레이터 방전실험  
 Fig. 8. Lithium-ion battery simulator discharging experiment

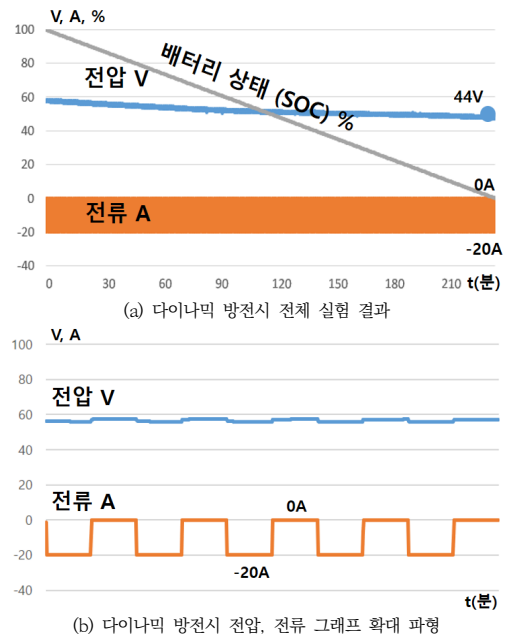


그림 9. 리튬이온 배터리 시뮬레이터 다이내믹 방전실험  
 Fig. 9. Lithium-ion battery simulator discharging experiment

## IV. 결 론

이차전지 배터리를 제조하는 기술 발전으로 배터리의 크기는 점점 작아지면서 효율성이 높아지고 있다. 따라서 이러한 기술개발 속도에 맞춰 배터리 성능시험은 특성, 수명, 고장진단, 재활용 등의 다양한 시험방법을 요구하고 있다. 이러한 요구사항에 맞춰 본 논문에서는 시험품인 리튬이온 배터리의 충·방전에 따른 특성을 살펴 보기 위해 소프트웨어를 기반으로 시험 장비를 설계 및 제작하였다.

리튬이온 배터리와 리튬이온 배터리 시뮬레이터의 정상범위 내의 충전 및 방전실험 그리고 다이내믹 방전실험을 통해 동일한 실험 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 본 논문에서 설계 제작한 소프트웨어 시험장비를 이용하여 이차전지의 동특성 및 신뢰성과 안전성을 파악할 수 있다. 또한 배터리의 수명 감소, 보호회로 고장에 대한 최소화로 배터리를 이용한 기계기구의 손상과 화재로 인한 손실을 최소화할 수 있을 것으로 사료된다.

## References

- [1] National Fire Agency National Fire Information System, "Fire statistics for 2023," 2023.  
DOI: <https://www.nfds.go.kr/stat/general.do>
- [2] S. C. Bang and Y. H Yoon, "Performance and Reliability Analysis using Test Facilities for Secondary Lithium-ion Batteries," Trans. on KIEE, vol. 72, no. 12, pp. 1789-1794, 2023.  
DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2023.72.12.1789>
- [3] Y. H Yoon, "Characteristics of Lithium-ion(Li-ion) Batteries according to Charging and Discharging by Scenario," The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC), vol. 23, no. 4, pp. 171-176, 2023.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2023.23.4.171>
- [4] Elektro-Automatik Ltd, Application Note, Using Bidirectional Programmable DC Power Supplies for Battery Testing.
- [5] Elektro-Automatik Ltd., EA-PSB 9000 3U Datasheet.
- [6] M. Chen, G. A. Rincon-Mora, "Accurate, Compact, and Power-Efficient Li-Ion Battery Charger Circuit," IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, vol. 53, no. 11, pp. 1180-1184, 2006.

- [7] Simon Kim and Young Shin Lee, "Electrochemical Simulation for Limited-Discharge Current Prediction of Li-ion Secondary Cell Using High-Rate Discharge", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A, vol. 39, no. 8, pp. 807-812, 2015.

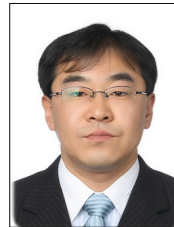
## 저 자 소 개

### 정 성 인(정회원)



- Technical University Braunschweig 전기정보물리공학과 (공학박사)
- 현재 : 광주대학교 전기공학과 교수
- 주관심분야 : 전기구동 퍼스널 e-모빌리티 부품 및 시스템

### 윤 용 호(정회원)



- 성균관대학교 메카트로닉스공학과 (공학박사)
- 한국산업기술시험원 책임연구원
- 현재 : 광주대학교 전기공학과 교수
- 주관심분야 : 전동기 제어 및 신재생 에너지

※ 이 연구는 2024년도 광주대학교 대학 연구비의 지원을 받아 수행되었음.