


# 리튬이온 배터리 증분용량 분석법 및 미세 내부 단락 주파수 분석을 이용한 열화 진단기법 연구

김문성<sup>1</sup>, 최윤숙<sup>1</sup>, 오영식<sup>1</sup>, 도정국<sup>1</sup>, 박철웅<sup>1</sup>, 이순형<sup>1</sup> , 윤영훈<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> 동신대학교 전기전자공학과

<sup>2</sup> 동신대학교 에너지리사이클링학과

## Study on the Degradation Diagnosis Technology Using Lithium-Ion Battery Incremental Capacity Analysis Method and MISC Frequency Analysis

Wen-Cheng Jin<sup>1</sup>, Youn-Sook Choi<sup>1</sup>, Young-Sik Oh<sup>1</sup>, Jung-Gug Do<sup>1</sup>, Chul-Woong Park<sup>1</sup>,  
Soon-Hyung Lee<sup>1</sup>, and Young-Hoon Yun<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Electrical and Electronic Engineering, Dongshin University, Naju 58245, Korea

<sup>2</sup> Department of Energy Recycling, Dongshin University, Naju 58245, Korea

(Received January 24, 2025; Revised February 24, 2025; Accepted February 26, 2025)

**Abstract:** Lithium-ion batteries are utilized as an energy source for electric vehicles because of their advantages such as excellent cyclability, high energy density, high capacity, high efficiency, and low price. However, lithium-ion batteries use combustible electrolytes, which have also reported problems related to fire safety. Therefore, research on the fire safety of lithium-ion batteries is actively being conducted. In this study, detection criteria for the fire safety of lithium-ion batteries were proposed through incremental capacity analysis (ICA) and frequency analysis. The experimental results showed that the battery micro internal short circuit (MISC) indicator could be identified through changes in specific frequency bands and fluctuations in the ICA curve.

**Keywords:** Lithium-ion battery, Incremental capacity analysis, State of health, End of life

### 1. 서론

최근 리튬이온 배터리는 카메라, 노트북, 이동통신 단말기 등 소형 휴대용 제품의 사용 및 보급과 함께 전기자동차 (EV), 하이브리드(HEV) 등 중대형 에너지 저장 장치로 많은 관심과 수요가 늘어남에 따라 배터리의 개발 필요성이

지속 증가하고 있다. 리튬이온 배터리는 높은 에너지 밀도, 긴 수명, 낮은 자가 방전 속도 및 높은 효율 등 장점으로 인해 전기자동차의 에너지원으로 많이 활용되고 있다 [1]. 그러나 현재 전기자동차에 사용되는 리튬이온 배터리는 리튬과 가연성 전해질을 사용해 배터리 자체에도 폭발의 위험이 있으며, 제조 공정에서도 재료의 분포 및 구조 설계의 결함으로 인한 화재 사례도 발표되고 있다 [2]. 또한 리튬이온 배터리는 충전 상태(state of charge, SOC)에 따라 폭발 위험성이 높아지며 특히 국내 발생 에너지 저장 장치 (energy storage system, ESS) 화재사고 50건 중 88% 이상 SOC에서 발생한 화재 건수는 42건으로 84%를 차지

✉ Soon-Hyung Lee; [leehyung@dsu.ac.kr](mailto:leehyung@dsu.ac.kr)  
Young-Hoon Yun; [yunh2@dsu.ac.kr](mailto:yunh2@dsu.ac.kr)

Copyright ©2025 KIEEME. All rights reserved.  
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.

한다는 연구결과도 발표되고 있다 [3]. 뿐만 아니라 리튬이온 배터리의 가장 큰 단점 중 하나로 온도에 민감한 특성 때문에 온도가 높은 환경일수록 열화가 빨라짐과 동시에 화재나 폭발 위험성도 증가한다. 이에 전기자동차 리튬이온 배터리의 열화 및 화재 안전성에 관한 연구들도 활발히 진행되고 있다 [4]. 일반적으로 배터리의 열화 상태를 수치적으로 분석하는 방법으로 수명 상태(state of health, SOH)를 통하여 현재 배터리의 상태를 추정할 수 있다.

배터리를 진단하는 방법은 크게 파괴적(ex-situ)과 비파괴적(in-situ) 방법으로 나눌 수 있다 [5]. 파괴적 방법은 SEM (scanning electron microscopy) [6], TEM (transmission electron microscopy) [7], XPS (X-ray photoelectron spectroscopy) [8] 등의 물질 분석을 통해 전극, 전해질의 변질 및 열화 상태의 정도를 분석하는 방법으로 배터리의 분해 없이 외부의 전기적 신호를 통해 배터리의 상태를 진단하는 방법으로 대표적으로 전기화학적 임피던스 분광법(electrochemical impedance spectroscopy, EIS) [9] 및 증분용량 분석법(incremental capacity analysis, ICA) [10]이 있다. 이러한 비파괴적 분석 방법은 배터리 운영 중 데이터 취득이 가능하다는 장점이 있다. 특히 증분용량 분석법은 전류 및 전압의 전기적 신호를 이용하여 Peak 특이점 거동 확인이 가능하고 배터리의 잔존 수명 SOH 추정이 가능하다 [11]. 또한 리튬이온 배터리에 주파수 분석을 진행한 선행 연구에서는 인산철 LiFePO<sub>4</sub> 파우치 배터리로 실험을 진행하였으며 비파괴적 실험은 제시하지 않았다 [12].

본 연구는 리튬이온 배터리 파괴적 및 비파괴적 실험 두

부분으로 진행하였으며 파괴적 실험에서 배터리 외형에 물리적 힘을 가해 얻은 이상신호 데이터와 비파괴적 실험에서 배터리 가속열화 충·방전 과정에서 얻은 이상신호를 검출하여 상관관계를 비교 분석하여 논문의 신뢰성을 높이고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 증분용량 분석법

배터리는 충·방전 진행에 따라 내부 화학 물질이 변화하고 이에 따라 배터리의 용량도 변화하게 된다. 리튬이온 배터리의 열화 상태는 일반적으로 리튬 저장소 감소(loss of lithium inventory, LLI), 활물질감소(loss of active material, LAM), 전도성 손실(conductivity loss, CL)로 분류할 수 있다 [13]. 전도성 손실은 내부 집전체(current collector) 부식 또는 바인더의 분해와 같은 배터리 내부 소재에 대한 열화와 관련이 있다 [14]. 활물질감소는 전해질 분해 또는 흑연의 박리 등 활성 물질의 구조적 변화와 관련이 있다 [14]. 리튬 저장소 감소는 리튬이온 배터리 음극 표면에 피막의 형성(solid electrolyte interphase, SEI) [15]으로 인해 입자 균열 및 기공이 막힘으로 나타난다 [16]. 표 1은 배터리의 각 노화 상태에 따른 원인을 나타내었다.

이러한 배터리 화학적 특성을 분석하는 방법으로 증분용량은 배터리의 일정한 전압 증가량(dV) 변화에 대한 그때의 미소용량(dQ)으로 아래와 같이 정의할 수 있다.

**Table 1.** Degradation mode and causes of lithium-ion battery [14].

Degradation mode	Potential aging mechanism	Effect
CL	Binder decomposition	Capacity fade
	Current collector corrosion	Power fade
	Electrode decomposition	Capacity fade & power fade
LAM	Crystal structure disordering	Capacity fade & power fade
	Transition metal dissolution	Power fade
	Formation of LI grains	Capacity fade
	Lithium plating	Capacity fade & power fade
LLI	Formation of LI grains	Capacity fade & power fade
	Lithium plating	Capacity fade & power fade
	Oxidation of electrolyte	Power fade
	Electrolyte decomposition	Capacity fade & power fade

$$IC = \frac{dQ}{dv} \quad (1)$$

여기서  $dV$ 는 전압의 순간 변화량,  $dQ$ 는 전압의 변화량에 따른 순간 용량을 의미한다. 증분용량 분석은 증분용량 곡선의 변화를 통해 리튬이온 배터리의 내부 열화 상태를 유추할 수 있다.

## 2.2 수명 상태(state of health, SOH)

배터리를 각 1회씩 충전과 방전하는 과정을 1 cycle이라고 한다. 리튬이온 배터리는 사이클이 증가할수록 점차 열화의 정도가 커지게 된다. 배터리는 열화 될수록 내부 저항이 높아져 발열이 심해지고 사고의 원인이 될 가능성이 커지게 되어 배터리의 열화 정도를 예측하는 것이 중요하다. 이를 예측하기 위해 상태 지표로 SOH를 사용한다. SOH란 배터리의 건강 상태나 잔존 수명을 나타내는 지표로 배터리의 초기 용량 대비 현재 용량을 나타내는 척도로 식 (2)와 같이 정의할 수 있다.

$$SOH = \frac{C_{current}}{C_{fresh}} \times 100(\%) \quad (2)$$

여기서  $C_{fresh}$ 는 배터리의 정격용량,  $C_{current}$ 는 현재 용량을 의미한다.

## 2.3 고속 푸리에 변환(fast fourier transform, FFT)

진동 데이터는 시간대 진폭 형태로만 존재할 때는 한계가 있다. 왜냐하면 시간 영역(time domain) 데이터만으로는 공진(resonances), 피크 변동(peak transients)과 같은 중요한 데이터들을 정확히 측정하기 어렵기 때문이다. 따라서 엔지니어들은 시간 데이터를 분석하기 위한 다양한 분석 방법을 적용하는데 이 중 하나인 스펙트럴 분석(spectral analysis) [17]은 시간 데이터를 주파수 스펙트럼으로 변환한다. 이러한 분석 방법 중 고속 푸리에 변환(fast fourier transform, FFT) [18]은 시간 영역 데이터를 주파수 영역(frequency domain)으로 변환하는데 사용되는 계산 알고리즘이다. FFT는 복잡한 계산을 빠르게 처리할 수 있으며 특히 이산 시간 푸리에 변환(discrete-time fourier transform)이라는 복잡한 수학적 연산을 효율적으로 구현할 수 있다 [19]. 신호를 일정한 시간 간격으로 샘플링하여 이 샘플링된 시간 데이터를 FFT 알고리즘을 통해 주파수 영역으로 바꾸면 해당 신호의 주파수 성분을 알 수 있다. 이러한 기법으로 리튬이온 배터리 열화 실험을 진행하여 배터리의 미세 내부 단락(micro internal

short circuit, MISC)을 실시간으로 진단함으로써 화재 발생 이전에 선제적으로 안전 대책을 마련할 수 있는 기술 개발을 목표로 한다.

리튬이온 배터리의 MISC 중 리튬 덴드라이트(Li dendrite) [20] 열화는 충전 시 음극(anode) 표면에서 점진적으로 수지상 형태로 성장하며 이는 분리막(separator)을 관통하여 내부에 단락(short)을 초래하여 안전성의 문제를 야기시킨다.

본 논문에서는 이러한 배터리의 MISC 이상신호와 공통 모드 전압(common mode voltage, CMV) [21]을 분석하여 배터리의 이상 징후를 검출하였다. CMV는 교류 기본파 성분, 직류성분, 스위칭 성분의 3가지 성분으로 합성되어 있다. 현재 ESS 화재사고 재난 피해가 많이 발표되고 있으며 전기적인 위해요인 중 하나인 CMV가 화재원인으로 추정되는 연구들도 발표되고 있다 [22].

## 3. 실험방법

### 3.1 비파괴적 실험

본 논문에서는 리튬이온 배터리의 이상 징후를 사전에 예측하기 위해 항온 챔버를 사용하여 상온(25°C) 및 고온(60°C) 조건에서 각각 열화 실험을 진행하였다. 선행 연구에서는 온도 조건으로 25°C, 45°C, 60°C 등 다양한 온도 조건으로 실험을 진행하였으나 본 논문에서는 배터리의 수명이 종료되기 직전의 신호를 분석하기 위한 가속열화 실험으로 가장 열악한 조건인 60°C 환경과 비교 데이터로 상온 25°C를 선정하였다 [23,24].

열화 실험은 각각 1C-rate, 2C-rate 조건으로 4.2 V 정전류-정전압(constant current constant voltage; CCCV) 모드로 충전 진행하였으며 2.5 V 정전류 모드로 방전하였다. 배터리 충·방전기는 NEWARE사의 CT 4008 모델 충·방전기를 사용하였다. 실험에 사용한 원통형 배터리 사양은 표 2와 같다.

**Table 2.** Cylindrical battery specifications.

Name	Samsung INR18650-30Q
Norminal capacity	3,000 mAh
Norminal voltage	3.6 V
Charge cut-off voltage	4.2 V
Discharge cut-off voltage	2.5 V

리튬이온 배터리는 상온 및 고온 조건에서 각각 열화 시킨 후 주파수 분석을 진행하였다. 사용한 주파수 측정 장비는 Picoscope 3000 series를 사용하였으며 시간축은 200 ms/div, 샘플링 속도는 80 MS/s. CMV 트리거 임계값은 각각 HFCT (high frequency current transformer, 1~500 MHz)에서는 250 mV, 전자파 안테나(0.5~30 MHz, 30~300 MHz)에서는 2 V로 설정하였다.

따라서 본 논문에서는 충·방전 시 발생하는 리튬이온 배터리의 MISC 이상신호와 CMV 노이즈를 각각 분석하였으며 이 결과값과 파괴적 시험에서 발생하는 신호와의 상관 관계를 비교 분석하였다.

### 3.2 파괴적 실험

본 논문에서는 파괴적 실험방법으로 원통형 배터리 외

형에 물리적 힘을 가하는 변형/파괴 실험을 진행하였다. 사용된 시료는 각각 끝이 뾰족한 바늘(needle) 시료, 반타원형(semi-elliptical) 시료, 구형(spherical shape) 시료 등 다양한 형태와 크기의 시료들을 사용하여 배터리에 물리적 손상을 유발하였다. 사용된 주파수 측정용 센서로는 광대역 안테나 EMW (electromagnetic wave, 300~2,000 MHz), 전자파 안테나(0.3~2 GHz, 0.5~30 MHz, 30~300 MHz), TEV (transient earth voltage, 0.5~20 MHz), HFCT (1~500 MHz) 등 다양한 종류의 센서들을 사용하여 주파수 대역 및 도미넌트 주파수(dominant frequency)를 조사하였다.

파괴/변형 실험은 특수 제작한 실험 장치 안에서 배터리 외부에 1 mm 단위로 물리적 힘을 가하면서 주파수를 측정하였다. 그림 1은 각종 시료 및 실험 장치 이미지이며 그림 2는 주파수 측정을 위한 실험 구성을 나타내었다.

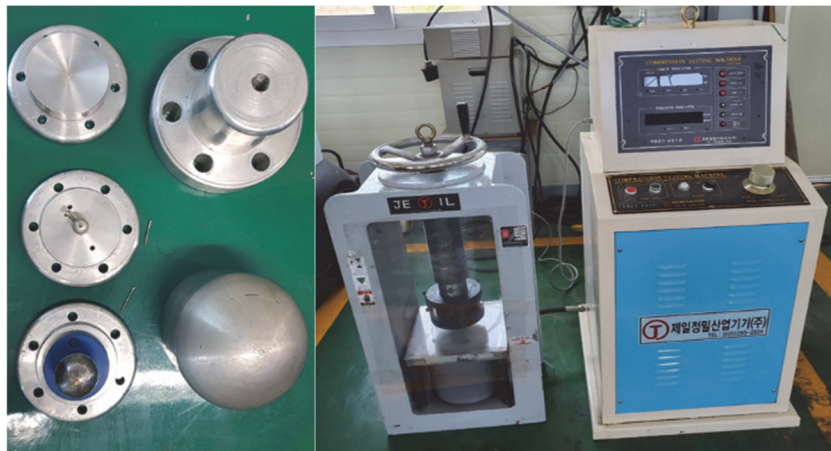


Fig. 1. The various samples and experimental devices.

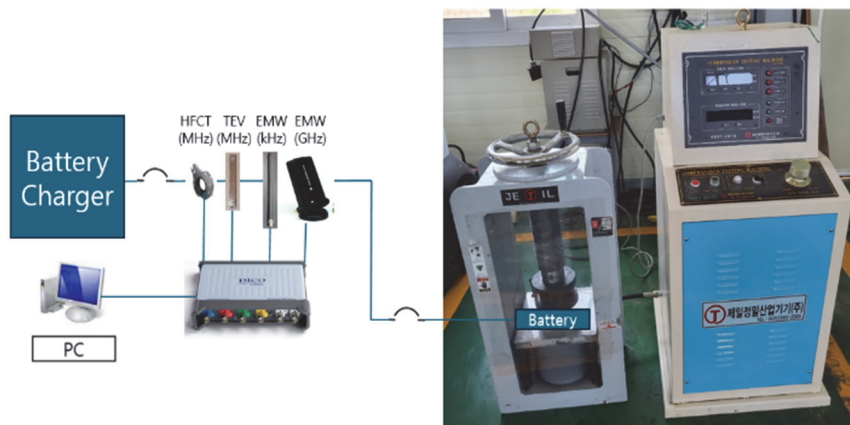


Fig. 2. Experimental configuration for frequency measurements.

### 4. 실험 결과

#### 4.1 비파괴적 실험 결과

증분용량 분석법은 일정한 전류를 충전 또는 방전하는 조건에서 실시간으로 배터리의 빠른 열화 확인 및 분석이 가능하였다. 따라서 본 논문은 증분용량 분석을 사이클 열화 실험의 충·방전 상황에 적용하며 그림 3은 열화에 따른 충·방전 과정에서의 증분용량 곡선의 변화를 나타내었다. 가로축 원점을 기준으로 윗부분 곡선은 충전 과정에서의 전압이 상승되면서 증분곡선을 보여주며, 가로축 아래부분 곡선은 방전 과정에서의 전압이 감소되면서 감분되는 것을 보여준다. 상온과 고온 비교 시 고온에서의 증분 및 감분 과정에서 1st-200th cycle에서의 갭(gap)차이가 더 현저하게 나므로 고온에서의 열화 정도가 더 심하다는 것

을 알 수 있다. 또한 그림 4는 열화 실험에 따른 용량 변화를 나타내었다.

열화 실험 결과 2C-rate 고온 조건에서 용량 감소가 가장 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 배터리 열화 실험에 따른 MISC 이상신호와 CMV 노이즈를 분석한 결과는 그림 5, 그림 6에 나타내었다. 그 중 HFCT 센서로 측정 시 CMV 노이즈는 전부 150 mV 이하, 이상신호는 250 mV 이상으로 확연히 구분됨을 알 수 있으며, 또한 전자파 안테나 센서로 측정 시 CMV 노이즈는 전부 0.4 V 미만에 있으며 이상신호는 1.5 V 이상으로 확연히 구분된다. 그림 5는 HFCT로 측정하였으며 (a), (b)에서 세로축은 신호의 크기(mV)이고 가로축은 시간( $\mu$ s)을 나타내며 (c)에서 세로축은 신호의 크기(dBm)를 나타내고 가로축은 대역폭(MHz)을 나타낸다. 그림 6은 전자파 안테나로 측정하였으며 (a), (b)에서 세로축은 신호의 크기(V)이고 가로축은 시

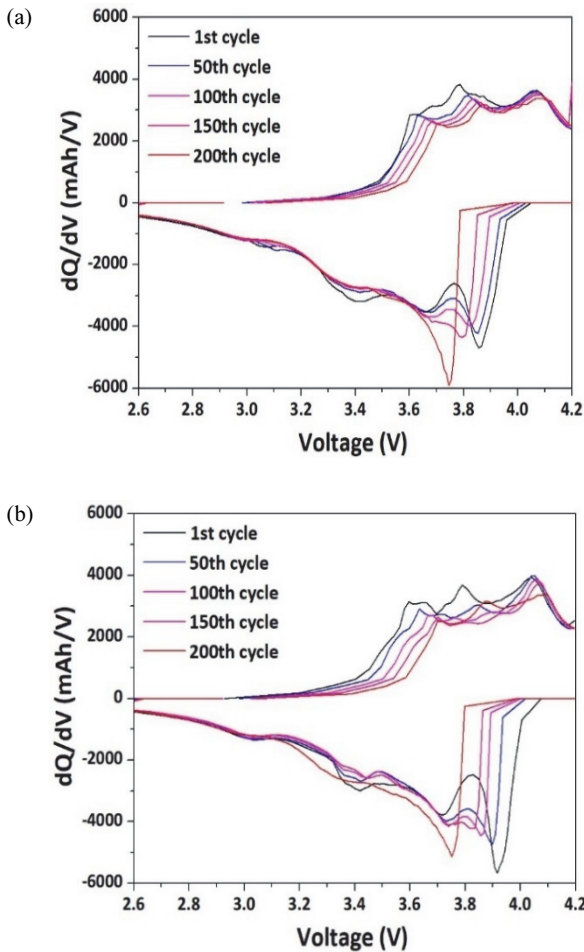


Fig. 3. The incremental capacity curve during the charge and discharge process. (a) 2C-rate 25°C and (b) 2C-rate 60°C.

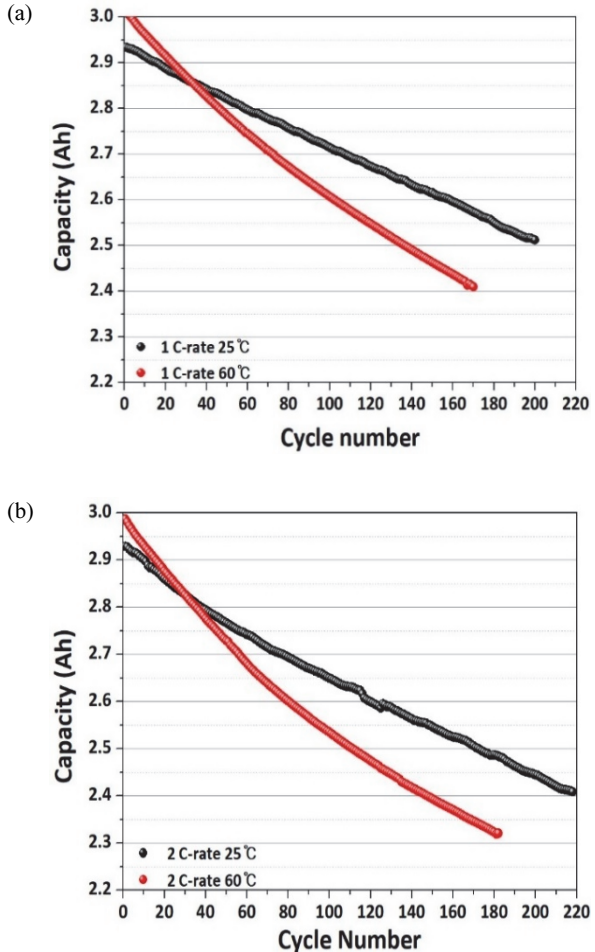
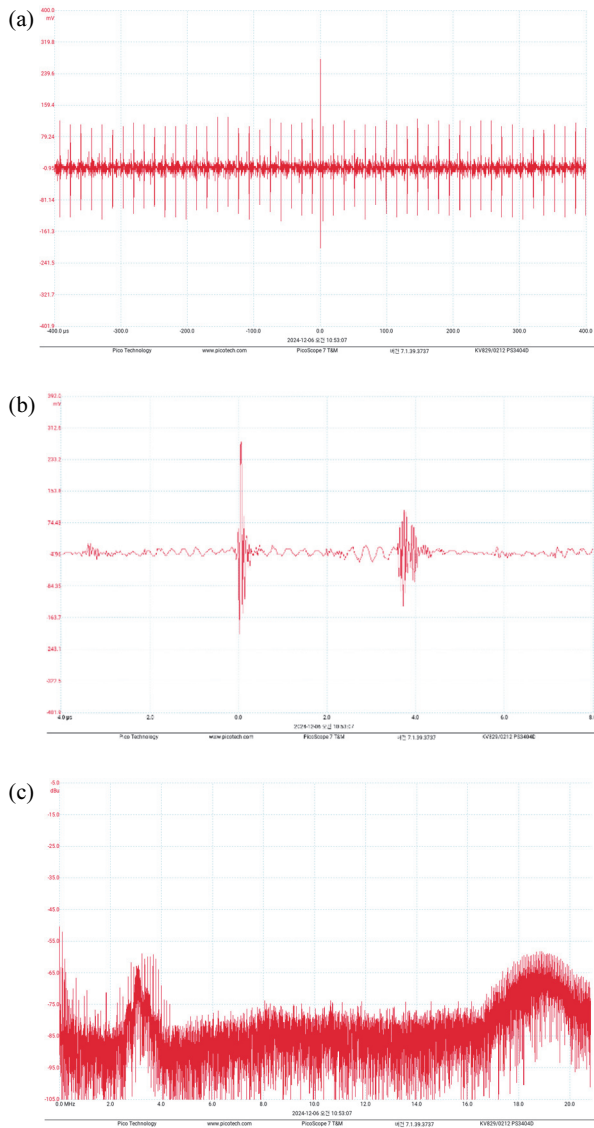


Fig. 4. Capacity change according to degradation experiment. (a) 1 C-rate and (b) 2 C-rate.

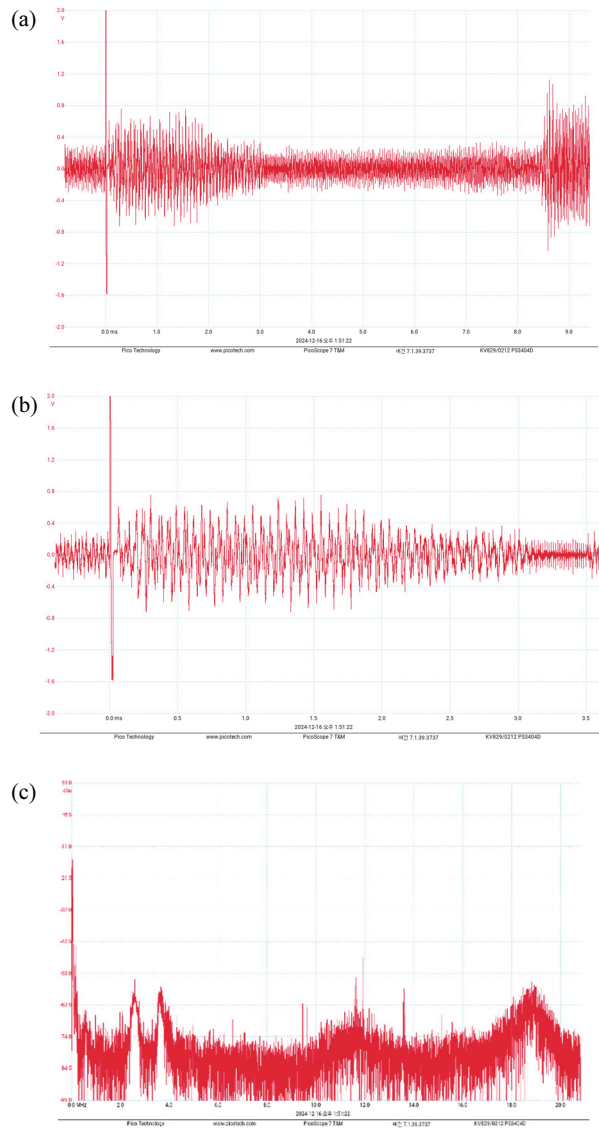
간(ms)을 나타내며 (c)에서 세로축은 신호의 크기(dBm)를 나타내고 가로축은 대역폭(MHz)을 나타낸다. 또한 그림 6은 배터리의 수명이 종료되기 직전에 검출된 신호로서 왼쪽 큰 신호가 검출된 이후 수십번의 0.4 V 이상의 이상신호가 검출된 후 배터리의 수명이 완전히 종료되었다. FFT 측정 결과는 HFCT에서는 3 MHz, 19 MHz 대역에서 크게 측정되었고, 전자파 안테나에서는 2.5 MHz, 3.5 MHz 및 19 MHz 대역에서 크게 측정되었다.

### 4.2 파괴적 실험 결과

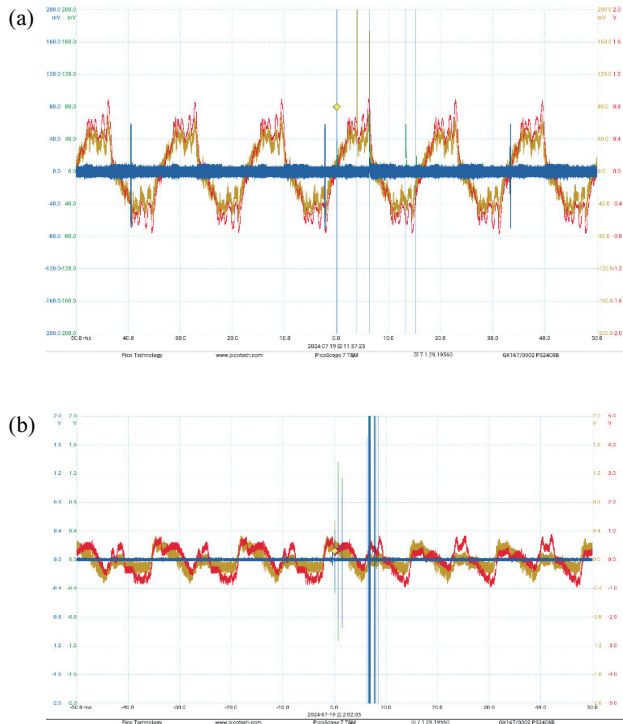
본 논문에서는 파괴적 실험과 배터리 가속열화 비파괴적 실험을 비교한 결과, 신호의 크기와 주파수 대역 등에서 유사한 경향이 나타났다. 이는 배터리 분리막의 열화 또는 외부에서 물리적 힘을 가해 MISC 상태가 발생할 경우 특정 신호가 측정됨을 알 수 있다. 파괴적 실험에서도 CMV 노이즈와 이상신호는 구분이 가능하다는 것을 확인할 수 있으며 그림 7은 그 결과를 보여준다.



**Fig. 5.** Results of MISC analysis based on degradation experiment (HFCT). (a) Results of HFCT sensor defect signal and noise, (b) magnification of signal and noise in Fig. 5(a), and (c) results of FFT analysis.



**Fig. 6.** Results of MISC analysis based on degradation experiment (electromagnetic antenna). (a) Results of electromagnetic antenna sensor defect signal and noise, (b) magnification of signal and noise in Fig. 6(a), and (c) results of FFT analysis.



**Fig. 7.** Results of MISC analysis based on destructive experiment. (a) HFCT and (b) electromagnetic antenna.

## 5. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 증분용량 분석법을 활용하여 배터리의 열화 상태를 분석하고, 리튬이온 배터리의 주파수 신호 분석을 통해 이상신호를 검출할 수 있음을 확인하였다. 배터리의 증분용량 곡선에서 열화 정도에 따라 이상신호의 크기가 달라지며, 사용된 센서의 종류(고주파 HFCT, 저주파 전자파 안테나)에 따라라도 그 크기에 차이가 발생한다. 하지만 CMV 노이즈는 일정한 주기성을 가지며, 이상 징후가 발생할 경우 노이즈보다 훨씬 큰 신호로 나타나기 때문에 명확하게 구분할 수 있음을 확인하였다. 또한 이상 징후가 있는 주파수 대역은 수 MHz에서 수십 MHz 대역에 있음을 확인하였다.

본 논문에서는 파괴적 방법과 비파괴적 방법을 활용하여 배터리의 열화 상태를 분석하였다. 이를 통해 배터리 가속열화 과정에서 검출된 신호(비파괴적)와 배터리 외형에 물리적 힘을 가하여 내부 MISC 상태에서 검출된 신호(파괴적)간의 발생 패턴이 유사함을 확인하였다. 본 연구의 결과는 전기차 리튬이온 배터리 화재 예방을 위한 새로운 진단 방법으로 적용될 것으로 예상된다.

향후 연구에서는 다양한 유형의 리튬이온 배터리를 사용하여 저온을 포함한 다양한 온도 조건에서 열화 실험을 진행하고, 이를 통해 측정된 주파수 파라미터의 신뢰성을 검증할 필요가 있다. 또한, 다른 종류의 배터리들에서도 유사한 패턴이 나타나는지 확인하는 추가 검증이 요구된다.

## ORCID

Soon-Hyung Lee  
Young-Hoon Yun

<https://orcid.org/0009-0001-1733-5013>  
<https://orcid.org/0000-0001-5583-7447>

## 감사의 글

본 과제는 2024년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다(2021RIS-002).

## REFERENCES

- [1] Y. Nishi, *J. Power Sources*, **100**, 101 (2001).  
doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00887-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00887-4)
- [2] L. Zhang, J. Liu, P. Fan, L. Du, Y. Ma, B. Qu, G. Yin, Q. Fu, F. Yang, and C. Zhang, *J. Power Sources*, **459**, 227842 (2020).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.227842>
- [3] J. Y. Kim, S. J. Choi, J. H. Kim, G. H. Lee, J. S. Jung, and K. M. Shong, *Trans. Korean Inst. Electr. Eng.*, **72**, 1760 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2023.72.12.1760>
- [4] O. K. Lim, S. Kang, M. Kwon, and J. Y. Choi, *Fire Sci. Eng.*, **35**, 21 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.7731/KIFSE.8172e9b4>
- [5] R. Li, D. Ren, S. Wang, Y. Xie, Z. Hou, L. Lu, and M. Ouyang, *J. Energy Storage*, **40**, 102788 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102788>
- [6] A. Kato, H. Kowada, M. Deguchi, C. Hotehama, A. Hayashi, and M. Tatsumisago, *Solid State Ionics*, **322**, 1 (2018).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2018.04.011>
- [7] C. M. Wang, W. Xu, J. Liu, D. W. Choi, B. Arey, L. V. Saraf, J. G. Zhang, Z. G. Yang, S. Thevuthasan, D. R. Baer, and N. Salmon, *J. Mater. Res.*, **25**, 1541 (2010).  
doi: <https://doi.org/10.1557/JMR.2010.0198>
- [8] V. Shutthanandan, M. Nandasiri, J. Zheng, M. H. Engelhard, W. Xu, S. Thevuthasan, and V. Murugesan, *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.*, **231**, 2 (2019).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.elspec.2018.05.005>
- [9] M. Y. Lee, S. Han, J. H. Park, and J. H. Kim, *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, **38**, 749 (2021).  
doi: <http://doi.org/10.7736/JKSPE.021.040>

- [10] D. Anseán, V. M. García, M. González, C. Blanco-Viejo, J. C. Viera, Y. F. Pulido, and L. Sánchez, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **55**, 2992 (2019).  
doi: <http://doi.org/10.1109/TIA.2019.2891213>
- [11] E. Schaltz, D. I. Stroe, K. Nørregaard, L. S. Ingvarlsen, and A. Christensen, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **57**, 1810 (2021).  
doi: <http://doi.org/10.1109/TIA.2021.3052454>
- [12] K. H. Jang, S. J. Hwang, S. K. Chun, and J. H. Lee, *J. Mater. Sci. Manuf. Res.*, **4**, 2 (2023).  
doi: [http://doi.org/10.47363/JMSMR/2023\(4\)154](http://doi.org/10.47363/JMSMR/2023(4)154)
- [13] C. R. Birkel, M. R. Roberts, E. McTurk, P. G. Bruce, and D. A. Howey, *J. Power Sources*, **341**, 373 (2017).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.12.011>
- [14] C. Pastor-Fernández, K. Uddin, G. H. Chouchelamane, W. D. Widanage, and J. Marco, *J. Power Sources*, **360**, 301 (2017).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.042>
- [15] J. M. Tarascon and M. Armand, *Nature*, **414**, 359 (2001).  
doi: <https://doi.org/10.1038/35104644>
- [16] J. Vetter, P. Novák, M. R. Wagner, C. Veit, K. C. Möller, J. O. Besenhard, M. Winter, M. Wohlfahrt-Mehrens, C. Vogler, and A. Hammouche, *J. Power Sources*, **147**, 269 (2005).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.01.006>
- [17] J. Muthuswamy and N. V. Thakor, *J. Neurosci. Methods*, **83**, 1 (1998).  
doi: [https://doi.org/10.1016/S0165-0270\(98\)00065-X](https://doi.org/10.1016/S0165-0270(98)00065-X)
- [18] J. W. Cooley, P. A. Lewis, and P. D. Welch, *IEEE Trans. Educ.*, **12**, 27 (1969).  
doi: <http://doi.org/10.1109/TE.1969.4320436>
- [19] C. Offelli and D. Petri, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **40**, 972 (1991).  
doi: <https://doi.org/10.1109/19.119777>
- [20] M. K. Song, S. Park, F. M. Alamgir, J. Cho, and M. Liu, *Mater. Sci. Eng. R Rep.*, **72**, 203 (2011).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2011.06.001>
- [21] B. Gu, J. Dominic, B. Chen, and J. S. Lai, *Proc. IEEE Energy Convers. Congr. Expo.* (IEEE, Denver, CO, USA, 2013) p. 5145.  
doi: <https://doi.org/10.1109/ECCE.2013.6647396>
- [22] S. M. Choi, S. H. Kim, M. Y. Kim, and D. S. Rho, *J. Korea Acad.-Ind. Coop. Soc.*, **22**, 587 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.4.587>
- [23] J. H. Sung, F. Hasan, and H. D. Yoo, *J. Korean Electrochem. Soc.*, **23**, 57 (2020).  
doi: <https://doi.org/10.5229/JKES.2020.23.3.57>
- [24] H. K. Kang and S. S. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **36**, 29 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2023.36.1.5>