

# BMS 통신 센싱 데이터 고도화를 위한 RLS 기반 파라미터 추정 및 GASF/MTF 부호화를 이용한 CNN 고장 진단

이동철, 장우혁, 박수빈, 안태건, 장준영, 김종훈\*  
충남대학교, \*충남대학교

cheol9883@naver.com, wksstjr99@naver.com, callimorphous333@naver.com,  
atg0402@naver.com, juns0926@naver.com, \*whdgns0422@cnu.ac.kr

## RLS-Based Parameter Estimation and CNN Fault Diagnosis Using GASF/MTF Coding for BMS Communication Sensing Data Advancement

Lee Dong Cheol, Jang Woo Hyeok, Park Su bin, Aan Tae Geon,  
Jang June young, Kim Jong Hoon\*  
Chungnam National Univ., \* Chungnam National Univ.

### 요 약

본 논문은 기존 배터리 관리 시스템(Battery management system; BMS)은 전압, 전류, 온도 기반 보호 로직에 최적화되어 있으나, 실제 운용에서 빈도가 높은 State-of-charge(SOC) 20~ 80% 구간에서는 경미한 결함 셀이 존재해도 전압 극값(min/max)이나 단순 편차만으로 조기 진단이 어렵다. 본 논문은 통신 기반 실운용 환경에서도 적용 가능한 데이터 고도화 기반의 진단 프레임워크를 제안한다. 제안 방법은 1 차 RC Thevenin 등가회로(Electrical equivalent circuit model; EECM)와 재귀적 최소제곱(Recursive least squares; RLS)을 결합해 내부 모델 파라미터(옴 저항, 확산 저항, 확산 커패시턴스)를 실시간 추정한다. 사이클에 따른 시계열 차이를 정규화한 뒤, 전압 및 내부 파라미터 시계열을 Gramian angular summation field(GASF)와 Markov transition field(MTF)로 2D 이미지로 입력 데이터를 재구성하여 2D-Convolutional neural networks(CNN) 분류기로 정상/과충전/과방전 상태를 판별한다. 과충전, 과방전 1 사이클 전기적 남용으로 제작한 경미 이상 셀을 포함한 6S2P 모듈(25°C, 100 사이클, 4.1~ 2.9V) 실험 결과, 전압 기반 이미지보다 RLS 기반 내부 파라미터 이미지가 일관되게 높은 분류 성능을 보였으며, 특히 GASF 변환이 MTF 보다 안정적인 성능을 보였다. 본 연구는 원시 전압 신호의 한계를 보완하기 위해 추정 가능한 내부 상태 특징을 생성하고 이를 2D 표현으로 변환하여 CNN 이 학습 가능한 형태로 정규화했다는 점에서 실용적 기여를 제공한다.

### I. 서 론

현행 배터리 관리 시스템(Battery management system; BMS)는 전압 상/하한 및 전압 불균형 임계값 기반의 보호 로직 중심으로 설계되어 중간 State-of-charge(SOC) 20~ 80%에서 서서히 진행되는 내부 열화나 경미 불균형을 조기에 식별하는 데 한계가 있다[1]. 실제 운용 환경에서는 경미한 과충전/과방전 스트레스를 한두 차례 받은 셀도 초기 운용에서는 정상 셀과 전압 거동이 중첩되는 경우가 빈번하다. 이때 전압 기반 min/max 호출이나 단순 편차 모니터링은 극값이 충분히 발현되지 않는 구간에서 조기 경보가 어렵고, 대형 팩에서는 온도 센서 밀도가 제한되어 국소 열 이상도 가려질 수 있다. 이러한 배경에서 Differential voltage analysis(DVA), Incremental capacity analysis(ICA), 확장 칼만 필터(Extended Kalman filter; EKF), 데이터 기반 Convolutional neural network(CNN) 등 다양한 진단 방법이 연구되어 왔으나, 실무 적용에서는 운용 조건 의존성, 장비·운영 및 계산 복잡도 등 다수의 문제가 동시에 존재한다. 본 연구는 실제 운용 적용성에 초점을 맞춰, BMS 가 제공 가능한 기본

신호로부터 내부 상태 정보를 재귀적 최소제곱(Recursive least squares; RLS)을 통해 실시간 추정하고, 이를 CNN 이 학습 가능한 2D Gramian angular summation field(GASF)와 Markov transition field(MTF)으로 부호화하는 데이터 고도화 기반 진단 프레임워크를 제안한다.

### II. 본론

#### 2.1 경미한 비정상 모듈 제작 및 전기적 특성 실험

제조사 입고 불균형 팩 사례 분석에서, 보호 로직이 적용된 상태에서도 특정 직렬 셀의 이상이 초기에는 명확히 드러나지 않는 문제가 확인되었다. 중간 SOC 구간에서 정상/비정상 전압 범위가 겹쳐, 전압 불균형 임계값을 지속 충족하지 못하고 시스템이 정상으로 분류되는 현상이 발생했다. 전압 편차 기반 보호 로직이 열화 누적과 극심한 고장 상황에서는 민감하게 반응할 수 있지만, 조기 진단 지표로는 부족함을 시사한다. 이에 극심한 팩 고장이 아닌 경미 이상 체현을 위해 정상 상/하한 전압을 한 사이클만 초과하도록 프로파일을 설계하였다. 과충전은 5.0V 까지 충전, 과방전은 0.2V 까지 방전하여 비정상 셀 샘플을 확보하였다.

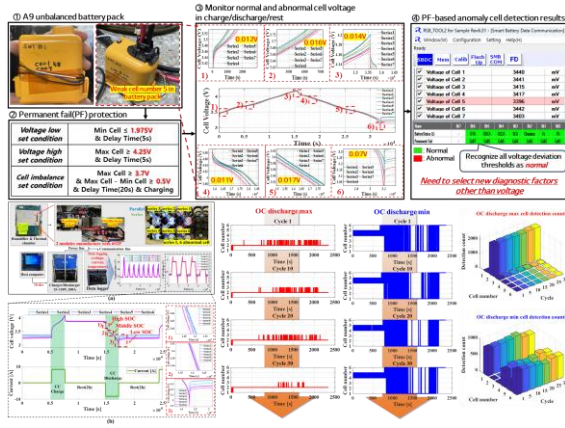


그림 1. 전압 기반 진단 구조적 한계 및 경미 비정상 모듈 전기적 특성 실험 결과

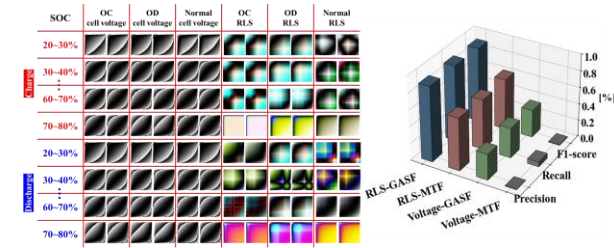


그림 2. GASF, MTF 이미지 데이터 셋 구성 및 분류 성능 평가 결과

이후 비정상 셀을 포함한 6S2P 모듈을 구성하여 보수적 운용 범위(4.1–2.9V, 1C)로 전기적 특성 실험을 수행하였다. 실험 결과는 그림 1에 나타내었으며 비정상 셀(1, 6번 직렬 셀)은 사이클이 진행될수록 열화가 가속되었으나, 초기 사이클 및 중간 SOC에서는 전압 거동이 정상 셀과 유사한 구간이 존재하여 전압 기반 초기 진단이 제한되었다.

## 2.2 RLS 기반 내부 모델 파라미터 추정 및 이미지 데이터 셋 구성

배터리 내부 상태를 간접적으로 해석 가능한 1차 RC 전기적 등가회로 모델을 사용하였다. 단자전압과 Open circuit voltage(OCV) 차이를 과전위로 정의하고, 확산 거동을 RC 네트워크로 표현한 후, 연속 방정식을 순방향 오일러로 이산화한다. RLS는 오차 계산, Gain 산출, 공분산 갱신, 파라미터 업데이트를 반복하며, 추정된 이산 파라미터로부터 직렬 저항(Internal resistance;  $R_i$ ), 확산 저항(Diffusion resistance;  $R_{diff}$ ), 확산 커패시터(Diffusion capacitance;  $C_{diff}$ )를 추정한다. 단일 전압 신호로는 드러나지 않는 내부 저항 상승 및 확산 시간상 변화를 확인할 수 있다. 사이클 진행에 따라 충/방전 시간이 단축되어 동일 SOC 구간의 시계열 길이가 달라지는 문제가 발생한다. 이는 고정 입력 크기를 요구하는 CNN 학습에 불리하므로, 본 연구는 SOC 20–80%를 10% 간격으로 세분화하고 각 구간별 시계열을 piecewise aggregate approximation(PAA)로 동일 길이로 정규화하였다. 또한 정상/비정상 분리가 유의미한 SOC 구간 설정을 위해 Fisher 분리도 기반 분석을 수행했으며, 10% 세분화가 전반적으로 높은 분리도를 보였다. 정규화된 1D 시계열은 두 가지 방식으로 2D 이미지로 변환한다. 이미지 재구성 기법은 GASF, MTF를 사용하였으며 GASF는 정규화된

시계열을 극좌표로 매핑 후 Gramian 행렬을 구성하여 시점 간 상관과 전역 패턴을 이미지로 표현한다. MTF는 값을 구간 양자화한 뒤 상태 전이 확률을 행렬로 만들어 전이 패턴을 이미지로 표현한다.

## 2.3 2D-CNN 분류기 및 성능 평가

CNN은 컨볼루션-풀링 블록을 반복하여 특징을 추출하고, Flatten 및 Dense 레이어를 통해 최종 분류를 수행한다. SOC 10% 구간(6개)×상태(정상/과충/과방)로 총 18개 클래스를 구성하여 지도학습으로 학습하였다. 성능 평가는 정확도뿐 아니라 정밀도(Precision), 재현율(Recall), F1을 함께 사용해 오탐/미탐 특성을 점검하였다. 이미지 데이터 셋 구성과 분류 성능 평가 결과는 그림 2와 표 1에 나타내었으며 RLS-GASF(F1-score 0.9) 기법의 분류 성능이 가장 높았다.

표 1. RLS 및 Voltage 기반 이미지 별 분류 성능 평가

	Precision	Recall	F1-score
RLS-GASF	0.9	0.91	0.9
RLS-MTF	0.63	0.6	0.61
Voltage-GASF	0.31	0.36	0.33
Voltage-MTF	0.003	0.057	0.006

## III. 결론

본 논문은 전압 기반 보호 로직이 취약한 중간 SOC 구간에서 경미 이상 셀을 조기에 구분하기 위해, RLS 기반 내부 파라미터 추정- PAA 정규화- GASF/MTF 2D 부호화- CNN 분류로 이어지는 데이터 고도화 기반 진단 프레임워크를 제안하였다. 과충전/과방전 1 사이클 전기적 남용으로 제작한 경미 이상 셀을 포함한 6S2P 모듈 실험에서, 전압 단일 신호로부터 생성된 이미지 데이터셋은 낮은 진단 성능을 보였으나, RLS로 추정된 내부 파라미터를 RGB로 융합한 이미지 입력은 CNN 분류 성능(0.9)을 크게 향상시켰다. 이는 단순 임계값/극값 감시를 넘어 내부 상태를 반영하는 특징을 학습 가능한 형태로 부호화하는 과정이 중요함을 보여준다.

## ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(RS-2025-00562934, EV 화재 및 폭발사고 역추적을 위한 이미지 기반 운용 이력/고장 패턴 인식 및 통합 관리 Open-Platform 구축)과 2024년도 정부 (산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술연구원(RS-2024-00398346, ESS 빅데이터 기반 O&M 및 자산관리 기술인력 양성)의 지원을 받아 수행되었음.

## 참고 문헌

- [1] Gou, Bin, et al. "Understanding the voltage inconsistency features in lithium-ion battery module." Journal of Energy Storage 115 (2025): 116007.