

# 전압 데이터 분석을 이용한 무선 이어폰 하이브리드 충전 초기 상태 판단기법

박찬형<sup>1</sup>, 이재민<sup>2</sup>, 김동성\*

국립금오공과대학교 전자공학부<sup>1,2,\*</sup>

{cksgud9831<sup>1</sup>, ljmpaul<sup>2</sup>, dskim\*}@kumoh.ac.kr

## A Voltage Data - based Initial State Detection Method for Hybrid Charging in Wireless Earbuds

Park Chan Hyung<sup>1</sup>, Jae-Min Lee<sup>2</sup> and Dong-Seong Kim\*

Kumoh National Institute of Technology

School of Electronic Eng.<sup>1,2,\*</sup>

### 요 약

본 논문은 선형 회귀 분석과 표준편차를 활용하여 무선 이어폰의 충전 불량 상태를 판별하는 판단기법을 제안한다. 기존 충전 방식의 한계에 대해 분석하고, 이를 보완하기 위한 새로운 충전 구조를 함께 제안한다. 제안하는 판단기법은 시간에 따라 센서로 측정된 전압 데이터의 변화 경향을 분석하고 선형 회귀 분석 결과를 기반으로 최종 충전 상태에 대해 판정한다. 판단기법의 유효성은 정상 충전 상태와 불량 충전 상태의 전압 특성을 반영한 데이터 값을 대상으로 MATLAB 시뮬레이션을 통해 성능을 검증한다.

### 1. 서론

사물인터넷(IoT) 기술의 확산과 함께 웨어러블 디바이스는 개인의 데이터를 수집·통신하는 핵심 단말로 발전하고 있다. 특히 무선 이어폰(True Wireless Stereo, TWS)은 가장 보급률이 높은 IoT 기기 중 하나로써 GMI(Global Market Insights) 조사를 따르면 글로벌 무선 이어폰 시장은 2032년까지 연평균 11%의 성장이 전망된다[1]. 그러나 기기의 사용 빈도가 높아짐에 따라 이어폰 유닛과 충전 케이스 사이의 물리적 접촉 불량으로 인한 충전 실패 문제가 주요한 품질 이슈로 주목받고 있다. 이러한 충전 실패는 실사용 시에 기기 가용성을 저하할 뿐만 아니라, 제품 전반에 대한 소비자 신뢰도와 만족도를 떨어뜨리는 원인이 된다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 유무선 충전의 이점을 결합한 하이브리드 충전 시스템을 제안한다. 제안하는 방식은 기존 접촉식 충전 과정에서 불량을 감지할 경우, 자동으로 비접촉식(무선) 경로로 전환하여 최적의 충전 경로를 결정하는 것을 목표로 한다. 이와 같은 자동 전환 기반 충전 시스템의 실효성을 확보하기 위해서는 충전 상태를 신속하고 신뢰성 있게 판단할 수 있는 판단기법이 필수적이다.

시스템의 신뢰성을 확보하기 위한 기존의 고장 진단 연구를 살펴보면, 다양한 분야에서 실시간 판단 기법이 꾸준히 제안되어왔다[2]. 특히 리튬이온 배터리를 사용하는 전자 분야에선 이러한 고장 진단 연구가 활발히 이루어지고 있다[3, 4]. 이러한 연구들은 데이터 기반의 실시간 모니터링을 통해 시스템의 안정성 및 신뢰성을 확보한다는 공통적인 목적을 가진다. 그러나 이러한 고성능 연산 기반의 기법을 소형 웨어러블 기기에 직접 적용하기에는 한계가 있다.

이에 본 논문에서는 이러한 고장 진단 메커니즘을 소형 웨어러블 기기 환경에 최적화하여, 무선 이어폰 초기 충전 구간의 전압 데이터를 기반으로 한 저 복잡도 기반의 새로운 충전 상태 판단기법을 제안한다. 제안하는 판단기법은 전압 데이터의 잔차(residual) 기반 표준편차(Standard Deviation)와 선형 회귀 분석(Linear Regression Analysis)을 이용한 2단계 판정 구조로서, 낮은 계산 복잡도를 유지하면서도 충전 불량을 효과적으로 판별하는 것을 목표로 한다.

### II. 판단기법 설계

#### Algorithm 1 Voltage-Based Charging State Decision Method

```
1: Input:  $V(t)$  — voltage samples during initial charging period
2: Output:  $S$  — charging state
3:  $V \leftarrow$  sample voltage data for a fixed duration
4:  $\mu \leftarrow$  estimate mean voltage trend using linear regression
5:  $\sigma_e \leftarrow$  compute residual standard deviation
6: if  $\sigma_e > \sigma_{th}$  then
7:   // Unstable charging candidate
8:   if  $\mu > \mu_{th}$  then
9:      $S \leftarrow$  Charging Unstable
10:   else
11:      $S \leftarrow$  Charging Fault
12:   end if
13: else
14:   // Stable charging candidate
15:   if  $\alpha > \alpha_{th}$  then
16:      $S \leftarrow$  Boundary State
17:   else
18:      $S \leftarrow$  Normal Charging
19:   end if
20: end if
21: return  $S$ 
```

판단기법 1 전압 데이터 기반 충전 상태 판단기법

판단기법 1은 전압 데이터를 이용한 충전 상태 판단 프로세스이다. 무선 이어폰에 사용되는 리튬이온 배터리는 CC-CV(Constant Current-Constant Voltage) 방식으로 충전되며, 정상적인 CC 구간에서는 전압이 시간에 따라 점진적으로 증가한다. 본 연구에서는 이러한 전압 상승 특성을 기반으로, 충전이 정상적으로 진행되고 있는지를 짧은 관측 구간에서 신속하게 판단하고자 한다. 센서가 전압을 감지한 시점부터 3초 동안, 0.1초 간격으로 총 30개의 전압 샘플을 수집하며, 수집된 전압 데이터에 판단기법 1을 적용한다. 이러한 3초 내외의 단기 관측 데이터 활용은 사용자가 이어폰을 케이스에 수납한 즉시 충전 불량 여부를 인지하고 하이브리드 전환을 수행할 수 있게 함으로써, 실시간 응답성을 확보한다.

제안하는 판단기법에서는 전압 상승 추세의 영향을 배제하기 위해, 전압 데이터에 대한 선형 회귀를 통해 평균 추세를 제거한 잔 차의 표준편차를 산출한다. 이러한 잔 차 기반 표준편차는 전압 증가 자체와 무관하게 데이터 자체의 순수한 전압 변동성만을 객관적으로 평가할 수 있다는 장점이 있다. 1차 판정 단계에서는 산출된 표준편차( $\sigma$ )가 임계값( $\sigma_{th}$ )을 초과하는 경우 충전 상태를 충전 불량 후보로 분류하며, 이를 충전 안정성 판단을 위한 핵심 지표로 활용한다. 잔 차 기반 표준편차는 수식(1)과 같이 정의한다.

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_i - \hat{V}_i)^2} \dots\dots\dots (1)$$

2차 판정에서는 1차 판정에서 분류된 전압 데이터에 대해 선형 회귀 분석을 수행하여 최종 상태를 확정한다. 회귀 기울기( $\alpha$ )가 임계값( $\alpha_{th}$ ) 미만인 경우, 이는 전압 변동성 노이즈이 존재할 뿐만 아니라 실질적인 에너지 유입에 따른 전압 상승이 정상적으로 이루어지지 않는 충전 불량 상태로 판정한다. 이러한 2단계 검증은 리튬이온 배터리의 CC 충전 구간에서 나타나는 선형적인 전압 특성을 판단 기준으로 삼음으로써, 단순한 접촉 불안정과 완전한 충전 실패를 명확히 구분하는 역할을 한다. 회귀 직선은 수식(2)과 같이 정의한다.

$$\hat{V}_i = \alpha t_i + b \dots\dots\dots (2)$$

본 연구에서 제안하는 판단기법은 잔 차 기반 표준편차와 회귀 기울기라는 서로 다른 특성을 단계적으로 적용함으로써, 단일 지표만으로는 구분이 어려운 불안정 상태와 충전 불량 상태를 전압 변동성과 상승 추세의 관점에서 더욱 신뢰성 있게 판별할 수 있도록 설계되었다. 임계값  $\sigma_{th}$ ,  $\alpha_{th}$ 은 정상 충전 상태 데이터를 기준으로 경험적으로 설정되었으며, 본 연구에서는 판단 구조의 유효성 검증에 초점을 둔다.

### III. 시뮬레이션

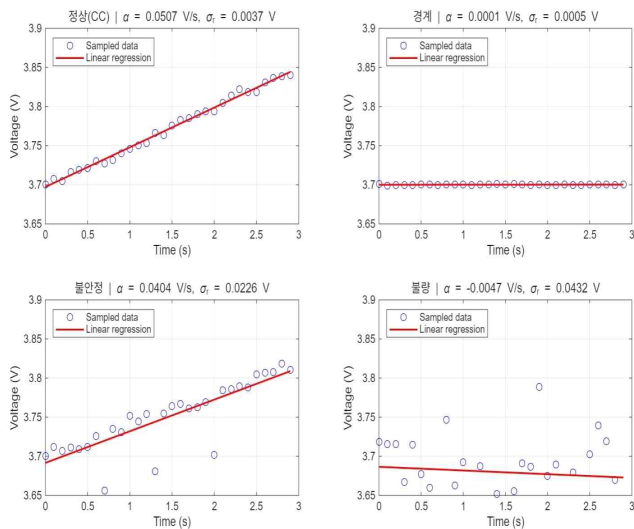


그림 1 CC-CV 전압 특성을 반영한 시뮬레이션 결과

그림 1은 CC-CV 방식의 전압 특성을 기반으로 생성된 시뮬레이션 결과이다. 무선 이어폰에 사용되는 리튬이온 배터리는 충전 초기 구간에서 전압 상승 특성을 보이므로, 해당 구간의 전압 변화를 대상으로 시뮬레이션을 진행하였다. 충전 시작 시점부터 3초 동안 0.1초 간격으로 전압을 샘플링하여 총 30개의 전압 데이터를 사용하였다. 충전 상태는 정상, 경계, 불안정, 불량의 네 가지로 구분하였다. 정상 상태는 리튬이온 배터리의 CC 구간 특성을 반영하여, 전압이 시간에 따라 일정하게 증가하는 양상을 보인다. 경계 상태는 충전이 시작되었으나 전압 상승이 0.05[V] 이내로 극히 미미하여, 실제 충전 진행 여부를 명확히 확정하기 어려운 모호한 상황을 반영하였다. 불안정 상태는 충전 도중 접촉 불량이나 일시적인 정렬 문제로 인해 국소적인 전압 강하가 발생하는 환경을 가정하였다. 불량 상태는 전압의 상승 추세가 거의 나타나지 않는 동시에, 전기적 불안정성

으로 인한 전압 변동성(노이즈)이 크게 관측되는 경우로 설정하였다.

각 상태의 전압 데이터에 대해 잔 차 기반 표준편차( $\sigma$ )를 계산하여 전압 변동성을 평가하고, 단순 선형 회귀를 통해 회귀 기울기( $\alpha$ )를 추정하였다. 표준편차 분석을 통해 충전 안정성을 판단한 후, 회귀 기울기를 이용해 실제 충전 진행 여부를 최종 판단하였다. 시뮬레이션 결과, 제안한 판단기법은 전압 상승 추세와 변동성을 동시에 고려함으로써 네 가지 충전 상태를 효과적으로 구분할 수 있음을 확인하였다.

### IV. 결론

본 논문에서는 무선 이어폰의 충전 초기 구간에서 측정된 전압 데이터를 이용하여 충전 상태를 판단하는 기법을 제안하였다. 제안한 판단기법은 전압 데이터의 평균 추세를 제거한 잔 차 기반 표준편차를 이용한 1차 판단과 단순 선형 회귀 분석을 통해 계산된 전압 상승 기울기를 이용한 2차 판단으로 구성된 2단계 구조로 설계되었다. 이러한 판단기법은 짧은 시간 동안 측정된 전압 데이터와 간단한 통계적 계산만을 사용하므로 계산 복잡도가 낮아 무선 이어폰과 같은 소형 전자기기에 적용할 수 있으며, 구조가 단순하여 향후 수정 및 확장이 수월하다는 장점이 있다. 특히 고성능 연산이나 복잡한 모델을 요구하지 않으면서도 충전 상태를 효과적으로 구분할 수 있다는 점에서 실용적인 대안이 될 수 있다. 이를 통해 충전 상태에 따라 유·무선 충전 방식을 자동으로 전환하는 하이브리드 충전 시스템에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 지역저능화혁신인재양성사업(ITP-2025-RS-2020-II201612, 33%)과 2025년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2018RI6A1A103024003, 33%)과 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT연구센터사업의 연구결과로 수행되었음 (ITP-2025-RS-2024-00438430, 34%)

### 참 고 문 헌

- [1] J. Zhang and J. Go, "Study on the correlation between PUX factors and continuous usage intention - focus on wireless earphone," Journal of the Korea Contents Association, vol. 22, no. 1, pp. 172-187, 2022.
- [2] M. R. Subhan, M. Golam, M. M. Alam, T. Jun, and D.-S. Kim, "Energy-Twin: Explainable AI-Driven Energy Optimization using Digital-Twin for Smart Industry," Proceedings of Symposium of the Korean Institute of communications and Information Sciences, pp. 275-276, 2024.
- [3] J. N. Njoku, A. U. Eneh, C. I. Nwakanma, J.-M. Lee, and D.-S. Kim, "HyBaTwin: Web-Based Hybrid Digital Twin Platform for Electric Vehicle Battery Capacity Estimation," The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, vol. 50, no. 4, pp. 549-560, 2025.
- [4] M. Kim, M. Lee, and J. Kim, "Representative Pseudo-EIS Extraction Method for Fault Diagnosis of EV Battery Modules Using DC-Based Pseudo-EIS," Power Electronics Conference, pp. 608-609, 2025.