

이 름 오태림

지도교수 이환용

멘 토 오병준 (RTst)

개발동기 및 목적



배터리 정비 시, 비중계와 육안을 통해 열차 하나당 약 80개 가량 존재하는 배터리셀 하나하나를 점검 하고 있습니다. 비중이랑 액위를 따로 측정하니 시간이 너무 오래 걸리고 번거롭습니다. 정확하고 빠르게 판독할 수 있는 통합 키트가 있으면 좋겠습니다.



일반 철도 차량(OL, 8200, 8500, 누리로, ITX마을 등)에 장착된 배터리의 실제 점검·정비 현장 사진

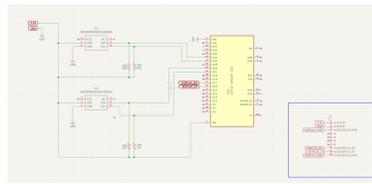
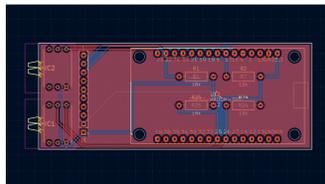
- 기존에는 사람이 직접 눈금을 읽는 방식으로 측정했기 때문에 정확도 편차와 정비 일관성 저하 문제가 있음. 이로 인해 정비 효율성과 정밀도를 높일 수 있는 개선의 필요성이 대두됨.
- 따라서 본 프로젝트에서 하나의 정비 키트로 액위, 비중을 통합 측정하고, 측정값을 직관적인 수치로 표시할 수 있는 철도 배터리 정비 키트 개발을 목표로 함

개발내용

하드웨어 → 펌웨어 → 데이터 전송 → 시각화까지 전 과정을 자체 설계 및 구현함.

센서 제작 및 하드웨어 설계

- 차압 센서 기반 비중 측정 모듈 직접 설계 및 PCB 제작 (소형화 및 내구성 향상)



구분	설명	문제점 / 한계	결론
직접 접촉 방식	센서를 전해액에 직접 담가 액위를 측정	• 전해액 접촉으로 부식·내구성 저하 • 오염 가능성 • 장기간 사용 시 신뢰도 저하	부적합
기계식 방식	도르래·부력 등 기계 구조로 액위/높이 측정	• 17mm 협소 공간에서 구조 구현 어려움 • 기구부 마찰로 인한 오차 발생 • 소형화 한계	부적합
비접촉 압력 방식 (최종 채택)	튜브로 전해액 압력을 간접 측정해 액위·비중 산출	• 전해액과 센서 분리 → 부식 없음 • 유지보수성 우수 • 전해액에 영향 없음 • 소형화에 유리(센서 크기 문제 해결)	적합

- 센서의 P1-P2 포트에 유체 높이차를 형성하여 ΔP(차압)를 생성.
- 내부 피에조저항 브리지 → 전압 → 내장 24bit ΔΣ ADC 변환 → I²C(400kHz)로 디지털 출력.
- ESP32 MCU가 해당 I²C 데이터를 수집하며, 배터리 진단 시스템에 통합.

펌웨어 및 보정 알고리즘

- 센서 데이터는 비동기 원샷 방식으로 요청 후 24비트 데이터를 수신.
- BUSY 비트를 폴링하여 측정 완료를 감지하고, 정확한 타이밍으로 데이터를 획득.
- 출력된 디지털 값(OUT_MIN~OUT_MAX)을 기반으로 압력값(Pa) 선형 보정식을 구현.

$$P_{real} = \frac{(C - OUT_{MIN})(P_{MAX} - P_{MIN})}{OUT_{MAX} - OUT_{MIN}} + P_{MIN}$$

- 온도, 전자 회로로 인한 오프셋 드리프트를 제거하기 위해 영점 보정 알고리즘을 적용
- 측정 노이즈 완화를 위해 30회 샘플 평균 필터 적용 → ±0.02Pa 수준의 안정적인 데이터 확보
- 측정된 압력으로 수두 기반 유체 밀도(ρ) 및 비중(SG) 실시간 계산
- 센서로부터 측정된 ΔP는 전해액 비중 ρ를 다음 공식으로 계산에 활용

$$\rho_{est} = \frac{\Delta P_{cal}}{g \cdot H_{head}}, \quad SG = \frac{\rho_{est}}{\rho_{water}}$$

- 계산된 비중과 샘플 수를 디스플레이로 출력 + MQTT를 통해 서버 전송

데이터 처리 및 통신

ESP32는 ΔP를 kPa → Pa로 변환한 뒤 이중 전송 구조로 데이터 처리

- 1) 디스플레이 실시간 출력 (현장 UI)
UART 기반 Nextion / LCD 디스플레이로 실시간 송출
현장에서 즉시 배터리 상태 확인 가능
- 2) MQTT 기반 무선 전송
Wi-Fi 기반 ESP32 MQTT Client로 Publish

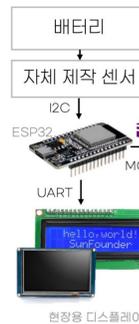
응용 및 시스템 통합

저장된 로그는 대시보드에서 분석 가능하며, 유지보수·고장 예측까지 확장 가능

주요기술

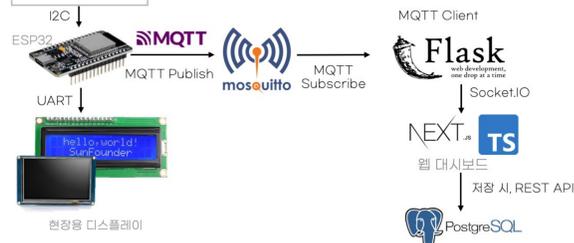
배터리 모듈 & 센서

- 자체 제작 장비를 사용하여 배터리 상태 실시간 측정
- 센서를 통해 들어오는 데이터를 ESP32가 I2C통신을 통해 수신 받음



MCU (ESP32)

- 센서 신호 수집 및 디지털 변환, 보정 (Tare) 및 평균값 처리
- UART 통신으로 현장 Display와 실시간 데이터 송수신
- MQTT 프로토콜로 서버에 데이터 전송
- 주기적 샘플링 및 데이터 안정화 처리 → 신뢰성 있는 측정값 생성



ESP32 → 서버

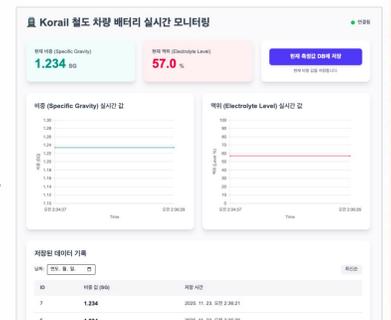
- 통신 방식: MQTT, Paho-MQTT
- 전송 데이터: SG(비중) 값, 샘플 수 등
- ESP32 코드에서 PubSubClient로 MQTT 브로커에 publish
- 서버는 MQTT 브로커에서 subscribe → 실시간 데이터 수신

서버 → 웹 (실시간 시각화)

- 통신 방식: WebSocket (Socket.IO)
- 서버가 MQTT에서 수신한 데이터를 Socket.IO로 웹에 push
- 웹은 Chart.js를 통해 실시간으로 그래프, 데이터 표시 업데이트 (Chart.js)

웹 → 서버 (데이터 저장)

사용자 클릭 시 서버에 최신 데이터를 저장 → 조건별 기록 조회 가능 (날짜 지정 등)



결과 및 분석

센서 성능 및 측정 안정성 검증

- Korail 측에서 제공받은 실제 배터리, 기존 정비 테스트기와 함께 비교 측정, 압력/비중 센서를 통한 액위 및 비중 측정 결과 샘플링 후 평균값, 실제 정비 결과, 영점 보정 전/후 비교 → 측정 안정성 확인
- Korail 차량기지 현장 테스트 진행 예정 (한국철도공사 강릉차량사업소) → 센서 데이터 정확성 확인, 현장 피드백을 기반으로 사용성 개선 및 하드웨어 보강 예정

정비 효율성 확대

- 기존 수동 정비 방식의 경우, 눈금 측정 방식으로 개인 차 존재 → 시간 소요, 오차 발생
- 키트 사용 방식을 통해 수치화된 측정, 정비 자동화, 데이터 값 저장 가능, 정비 시간 단축 및 정확도 향상

활용방안 및 기대효과

활용 방안

- Korail 본 공사 정식 제의 진행 (COP 건의 완료)
- 향후 3D 프린터를 활용해 소형·경량화된 하우징 제작, 휴대성 및 내구성 강화, 하드웨어 개선
- 검증 완료 후 Korail 정비 프로세스에 실사용 장비로 도입 추진 예정
- 철도 배터리 정비 키트 관련 특허 출원 추진 예정

기대 효과

- 상용화 시, 전사적 보급 및 운영 표준화 기여
- 철도 배터리 정비 효율 및 안정성 향상
- 사내 기술 자립 및 혁신 사례 창출

오픈소스 URL

<https://github.com/battery-korail/server>

