USENS
UNIVERSAL SENSING SOLUTION

SHOCK · VIBRATION · ENVIRONMENTAL DATA LOGGER

enDAQ

제품 운용 매뉴얼

데이터 로거 선정 · 설정 · 측정 · 분석까지
현장 운용자를 위한 실무 안내서

VERSION 4.0
ISSUED 2026. 09
PAGES 35

유센스 주식회사
enDAQ 공식 국내 총판 · www.usens.co.kr · sales@usens.co.kr

USENS
UNIVERSAL SENSING SOLUTION

목차 Contents · 이 문서의 사용법

enDAQ 장비를 현장에서 운용하는 사용자가 **장비 선정 · 설정 · 측정 · 데이터 분석 · 문제해결**까지 스스로 판단할 수 있도록 구성했습니다.

PART I · 제품 이해

1. enDAQ 플랫폼 개요 04
2. 제품군과 모델 구조 05
3. 모델별 사양 비교 06
3-1. 주요 4모델 가속도계 비교 06
3-2. 센서 계열별 사양 (E · R · D) 07
3-3. 환경센서 · 기구 · 배터리 08
4. 센서 타입 이해와 선택 09

PART II · 장비 운용

5. 측정 전 준비 12
6. enDAQ Lab 설정 14
6-1. 장치 연결 · General 탭 14
6-2. Measurements 탭 15
6-3. Triggers 탭 16
6-4. W-Series Wi-Fi 설정 17
7. 샘플레이트와 대역폭 18
8. 측정 실행 · 회수 · LED 20

PART III · 데이터 관리

9. IDE 파일 형식과 관리 21
10. 분석 소프트웨어 지원 22

PART IV · 분석 개념

11. PSD — 전력 스펙트럼 밀도 25
12. SRS / PVSS — 충격 응답 27

PART V · 실사용 사례

13. 적용 사례 개요 30
13-1. 기어박스 상태 감시 31
13-2. 드릴 헤드 충격 분석 33

PART VI · 문제해결

14. 일반 문제해결 33
14-4. LED 상태 패턴 34

표시 기호

★ **핵심**	현장 운용자가 반드시 알아야 하는 내용	⚠ **주의**	잘못 이해하면 데이터 품질에 영향을 주는 항목
✅ **참고**	알아두면 운용이 쉬워지는 보조 설명	✔ **체크**	측정 전후에 확인해야 할 절차 항목

PART I

제품 이해

Platform · Product Lines · Specifications · Sensor Types

- enDAQ 플랫폼의 구성과 운용 흐름
- 제품군 구조와 모델명 읽는 법
- 주요 모델 사양 비교 — S3 · S5 · W8
- 가속도계 세 계열의 차이와 선택 기준

1. enDAQ 플랫폼 개요 구성 요소와 운용 흐름

enDAQ는 충격 · 진동 · 환경 데이터를 현장에서 **독립적으로 기록**하는 데이터 로거 플랫폼입니다. 하나의 소형 장치 안에 가속도계 · 저장장치 · 배터리 · 환경 센서가 들어 있어, 별도의 DAQ 시스템 없이 설비나 구조물에 직접 부착해 측정합니다.

1-1. 플랫폼 구성 4요소

구성 요소	역할
enDAQ 하드웨어	현장 데이터 자율 기록 장치
enDAQ Lab	설정 · 다운로드 · 변환 · 분석 소프트웨어
enDAQ Cloud	원격 저장 · 공유 · 리포트 (W-Series)
Python Library	심화 분석 · 자동화 (오픈소스)

그림 1-1. enDAQ S3 시리즈 (S3-E100D40)

1-2. 운용 흐름 — 다섯 단계

단계	내용	도구
① **장비 설정**	Lab에서 샘플레이트 · 트리거 · 파일명 설정	enDAQ Lab
② **현장 부착**	볼트 · 테이프 · 자석으로 시험체에 고정	부착 도구 + 토크렌치
③ **측정 시작**	버튼 또는 트리거 조건으로 기록 시작	장비 버튼
④ **데이터 회수**	USB 연결 후 RECORD 폴더에서 IDE 원본 복사	PC + USB 케이블
⑤ **분석**	Lab에서 빠른 확인, Python으로 심화 분석	enDAQ Lab / Python

적용 대상

별도 계측기 · 배선 · 전원 없이 장비 단독으로 기록합니다. 회전체 · 이동 설비 · 운송 중 화물처럼 유선 계측이 어려운 개소에 적용합니다.

2. 제품군과 모델 구조 시리즈 구분과 모델명 해독

2-1. S-Series vs W-Series

구분	S-Series	W-Series
특징	표준 현장 기록 센서 (USB 회수)	Wi-Fi 내장, Cloud 자동 업로드
주요 모델	S3 · S4 · S5	W5 · W8
케이스 소재	S3: 폴리카보네이트 / S4 · S5: 알루미늄	알루미늄
추천 용도	일반 현장 측정, 반복 측정	원격지, 장시간 무인 모니터링

2-2. 모델명 읽는 법

S3 – E100 + D40

시리즈 · 폼팩터 | 주 가속도계 타입 · 범위 | 보조 가속도계 타입 · 범위

부분	의미	예시
S	시리즈 (S = Standard, W = Wi-Fi)	S = 표준 현장 센서
3	폼팩터 번호 (크기 · 케이스)	3 = 소형 폴리카보네이트
E100	주 가속도계 타입 / 범위	E = Piezoelectric, 100 = ±100 g
D40	보조 가속도계 타입 / 범위	D = Digital Capacitive, 40 = ±40 g

가속도계 타입 기호

기호	센서 타입	범위 옵션	주 용도
E	Piezoelectric (압전)	±25 / 100 / 500 / 2,000 g	고주파 진동, 일반 충격
R	Piezoresistive (압저항)	±100 / 500 / 2,000 g	고급 충격 시험, 파형 정밀도
D	Digital Capacitive (MEMS)	±8 / 16 / 40 / 200 g	저주파 · DC · 기울기 · 방향

⚠ 모델명의 숫자는 범위이지 품질이 아닙니다

E100이 E25보다 더 좋은 센서가 아닙니다. 범위가 크면 큰 이벤트를 잡을 수 있지만, 작은 진동의 노이즈 · 분해능 측면에서는 **E25가 유리**합니다. 측정 대상의 예상 최대값보다 조금 큰 범위를 고르는 것이 원칙입니다.

3. 모델별 사양 비교 S3 · S5 · W8 주요 4모델

현장에서 가장 많이 선택되는 **4개 모델**의 실측 사양입니다. 케이스 소재가 대역폭을, 배터리 용량이 기록 시간을 결정합니다.

3-1. 가속도계 사양

항목	S3-D40	S3-E100D40	S5-E100D40	W8-R100D40
주 가속도계	—	Piezoelectric	Piezoelectric	Piezoresistive
주 측정 범위	—	±100 g	±100 g	±100 g
주 샘플레이트	—	20,000 Hz	20,000 Hz	20,000 Hz
주 대역폭	—	**5 ~ 1,000 Hz**	**5 ~ 2,000 Hz**	**0 ~ 2,000 Hz**
주 노이즈	—	< 0.04 gRMS	< 0.04 gRMS	< 0.08 gRMS
주 분해능	—	< 0.005 g	< 0.005 g	< 0.01 g
보조 가속도계	Digital Capacitive	Digital Capacitive	Digital Capacitive	Digital Capacitive
보조 범위 / 대역	±40 g / 0~300 Hz	±40 g / 0~300 Hz	±40 g / 0~300 Hz	±40 g / 0~300 Hz
보조 샘플레이트	4,000 Hz	4,000 Hz	4,000 Hz	4,000 Hz
보조 분해능	0.00008 g	0.00008 g	0.00008 g	0.00008 g

기구 · 전원 사양

항목	S3-D40	S3-E100D40	S5-E100D40	W8-R100D40
케이스 소재	폴리카보네이트	폴리카보네이트	알루미늄 7075	알루미늄 7075
질량	40 g	40 g	100 g	250 g
치수 (L×W×T)	76.2 × 29.8 × 15.0	76.2 × 29.8 × 15.0	76.2 × 47.0 × 18.3	99.8 × 58.6 × 45.6
배터리	250 mAh	250 mAh	850 mAh	4,000 mAh
저장 용량	8 GB	8 GB	8 GB	16 GB
체결 볼트 / 토크	4-40 / 70 in-oz	4-40 / 70 in-oz	4-40 / 70 in-oz	10-32 / 23 ft-lb
무선	—	—	—	**Wi-Fi + Cloud 업로드**
주 용도	일반 진동 · 저주파	범용 진동 · 충격	정밀 진동 (넓은 대역)	충격 · 무선 원격 운용

모델 선택 시 확인 사항

대역폭 — 같은 ±100 g 압전 센서라도 S3(폴리카보네이트)는 1,000 Hz, S5(알루미늄)는 2,000 Hz까지 응답합니다. 케이스 강성이 고주파 전달 특성에 영향을 줍니다.
센서 계열 — 충격 파형 자체가 판정 기준이면 **R 타입(압저항)**을 선택합니다. R 타입은 W8뿐 아니라 **S5-R500D40 · S5-R2000D40**으로도 제공됩니다.
기록 시간 — W8은 4,000 mAh 배터리로 100 Hz 연속 44일, 주기 트리거 운용 시 더 긴 기간 기록이 가능합니다.

3-2. 센서 계열별 상세 사양

같은 계열 안에서 **측정 범위가 커질수록 노이즈와 분해능은 나빠집니다.** 필요 이상으로 큰 범위를 고르면 작은 진동을 놓칩니다.

Piezoelectric — E계열 (압전)

사양 항목	E25	E100	E500	E2000
측정 범위	± 25 g	± 100 g	± 500 g	± 2,000 g
광대역 노이즈	< 0.01 gRMS	< 0.04 gRMS	< 0.20 gRMS	< 0.80 gRMS
분해능	0.0008 g	0.003 g	0.015 g	0.06 g
샘플레이트	100 Hz ~ 20 kHz	100 Hz ~ 20 kHz	100 Hz ~ 20 kHz	100 Hz ~ 20 kHz
주파수 응답	5 ~ 2,000 Hz (AI)	5 ~ 1,000 Hz (PC)	5 ~ 1,000 Hz (PC)	5 ~ 1,000 Hz (PC)

Piezoresistive — R계열 (압저항)

사양 항목	R100	R500	R2000
측정 범위	± 100 g	± 500 g	± 2,000 g
광대역 노이즈	< 0.08 gRMS	< 0.40 gRMS	< 1.6 gRMS
분해능	< 0.01 g	< 0.05 g	< 0.2 g
주파수 응답	**0 ~ 2,000 Hz**	**0 ~ 2,000 Hz**	**0 ~ 2,000 Hz**
특성	DC-coupled · 포화 없음	DC-coupled · 포화 없음	DC-coupled · 포화 없음

Digital Capacitive — D계열 (MEMS)

사양 항목	D8	D16	D40	D200
측정 범위	± 8 g	± 16 g	± 40 g	± 200 g
광대역 노이즈	< 0.002 gRMS	< 0.01 gRMS	< 0.01 gRMS	< 0.14 gRMS
분해능	0.00002 g	0.004 g	0.00008 g	0.05 g
주파수 응답	0 ~ 300 Hz	0 ~ 500 Hz	0 ~ 300 Hz	0 ~ 500 Hz

★ 압전(E) vs 압저항(R) — 무엇이 다른가

두 계열 모두 20 kHz 샘플링에 고주파 충격을 다루지만 **결합 방식**이 다릅니다.

E계열(AC-coupled) : 회로에 커패시터가 있어 5 Hz 미만 정적 성분이 차단됩니다. 노이즈가 낮아 진동 품질은 가장 좋지만, 펄스 폭 1 ms 미만의 짧고 강한 충격에서 charge amplifier가 포화해 파형이 왜곡될 수 있습니다.

R계열(DC-coupled) : 커패시터 없이 직결되어 0 Hz부터 응답하고 **구조적으로 포화가 없습니다.** 노이즈는 E계열보다 높지만, 낙하 시험 · 파이로 충격 · 군수/항공 인증처럼 **파형 자체가 판정 기준**인 시험에 필요합니다.

3-3. 환경 센서 · 사용 환경 · 배터리

가속도계 외에 온도 · 압력 · 습도 등 **보조 환경 데이터를 함께 측정**합니다. 필요한 항목만 개별적으로 활성화할 수 있습니다.

내장 환경 · 보조 센서

센서	측정 범위	분해능	샘플레이트	활용
Gyroscope	±2,000 °/s (3축)	0.06 °/s	0 ~ 3,200 Hz	회전 속도, 자세 추적
Magnetometer	±1,300 µT	0.3 µT	0 ~ 10 Hz	절대 방위 (나침반)
Temperature	−40 ~ 85 °C	0.01 °C	0 ~ 10 Hz	환경 온도, 배터리 보정
Pressure	1 ~ 200 kPa	1.6 Pa	0 ~ 10 Hz	고도 변화, 챔버 압력
Humidity	0 ~ 100 % RH	0.04 % RH	0 ~ 10 Hz	보관 · 운송 환경 검증
Light	0 ~ 20 µV 이상	< 100 mlx	0 ~ 4 Hz	포장 개봉 이벤트 마커
Microphone W8	105 dB	—	0 ~ 20,000 Hz	소음 동시 기록
GPS W8	위치 2.5 m / 시각 60 ns	—	0 ~ 1 Hz	위치 이력, 시각 동기

사용 환경 한계 (전 모델 공통)

항목	범위	비고
동작 온도	−10 °C ~ 80 °C	충전은 0 ~ 45 °C 범위에서만 가능
권장 보관 온도	15 °C ~ 30 °C	장기 보관 시 배터리 수명 유지
습도	0 ~ 95 % RH	비응결 조건
압력	20 ~ 110 kPa	절대 압력
충격 한계	> 3,000 g	센서 손상 없이 견디는 한계
방진 · 방수	IP 50	**방수 아님** — 액체 노출 주의
전자파	2 MHz ~ 18 GHz @ 200 V/m 내성	MIL-STD-461F 시험 통과

샘플레이트별 기록 가능 시간 — 연속 기록 기준

샘플레이트	S3 (250 mAh) 저장 한계	S3 배터리 한계	S5 (850 mAh) 배터리 한계	W8 (4,000 mAh) 저장 한계	W8 배터리 한계
100 Hz	22 일	13 시간	44 시간	44 일	**7 일**
1,000 Hz	9 일	12 시간	41 시간	18 일	**7 일**
5,000 Hz	63 시간	9 시간	30 시간	6 일	**6 일**
20,000 Hz	17 시간	5 시간	17 시간	34 시간	**3 일**

기록 시간 판단

연속 기록 가능 시간은 **저장 용량과 배터리 중 짧은 쪽**이 결정합니다. S3를 20,000 Hz로 설정하면 저장 공간은 17시간분이지만 배터리는 5시간에 소진됩니다. 장기 측정이 필요하면 샘플레이트를 낮추거나 트리거 모드로 전환합니다.

4. 센서 타입 이해와 선택 E · R · D 세 계열의 역할 분담

4-1. 세 가지 가속도계 비교

구분	Piezoelectric (E)	Digital Capacitive (D)	Piezoresistive (R)
역할	고주파 진동 · 충격 (주)	저주파 · DC · 방향 (보조)	고급 충격 시험 (주)
DC 응답	❌ AC-coupled	✅ 가능	✅ DC-coupled
진동 품질	매우 우수 (낮은 노이즈)	저주파에 적합	우수하나 노이즈 높음
충격 포화	⚠ 가능성 있음	범위 제한적	✅ 포화 없음
정적 · 기울기	❌ 불가	✅ 가능	✅ 가능
측정 하한	5 Hz	**0 Hz**	**0 Hz**

4-2. 포화(Saturation) — 왜 문제가 되는가

포화는 센서나 신호 처리 회로가 입력을 더 이상 따라가지 못하는 상태입니다. **측정값이 실제값을 표현하지 못하므로 그 데이터로 계산한 SRS · PVSS 결과도 함께 틀어집니다.**

구분	포화 발생 시	포화 없을 때
파형 형태	최대값에서 평평하게 잘림 (클리핑)	입력 신호를 그대로 추적
충격 피크	실제보다 낮게 측정되거나 왜곡	실제 피크를 정확히 기록
전후 파형	충격 직전 · 직후 구간이 뒤틀림	전후 파형도 정확히 표현
회복 시간	회로 정상화까지 데이터 왜곡 지속	회복 시간 불필요
SRS / PVSS	왜곡 파형 기반 → 결과 부정확	신뢰 가능한 분석

포화가 생기는 두 가지 경우

시나리오	증상	해결
측정 범위 초과	파형이 최대값에서 평평하게 잘림	더 큰 범위로 교체 (E100 → E500)
Charge amp 포화 (압전 고유)	실제 g범위 이내인데도 충격 직전 · 직후 파형이 뒤틀리거나 드리프트	압저항(R계열) 센서로 전환 검토

> **⚠ 두 번째 경우가 더 까다롭습니다**
>
> ±100 g 센서에 80 g 충격이 왔는데도 파형이 이상하다면 범위 문제가 아닙니다. 펄스 폭 **1 ms 미만**의 짧고 강한 고주파 충격에서 내부 charge amplifier가 순간 과부하되는 현상입니다. 범위를 키워도 해결되지 않으며, 압저항 센서로 바꿔야 합니다.

4-3. D계열 DC 성분으로 기울기 · 방향 감지

D계열(DC-coupled)은 정지 상태에서 **중력 1g를 상시 측정**합니다. 이 값을 읽으면 부착 방향 검증부터 운송 중 뒤집힘 추적까지 정량적으로 확인할 수 있습니다.

상태	Z 축	X축	의미
수직 정상 부착	+1.000 g	0.000 g	기준 상태
5° 기울기	+0.996 g	+0.087 g	arcsin(0.087) = 5°
10° 기울기	+0.985 g	+0.174 g	arcsin(0.174) = 10°
180° 뒤집힘	−1.000 g	0.000 g	부호 반전 → 즉시 감지

θ = arcsin (X축 값 ÷ 1 g)
기울기 각도 계산식

DC 성분이 필요한 실제 이유

- **부착 방향 검증** — 정지 시 어느 축에 1 g가 뜨는지로 부착 각도를 즉시 확인
- **운송 중 자세 추적** — 화물이 뒤집힌 시각과 방향을 기록
- **순수 동적 성분 분리** — 전체 신호에서 중력분을 빼 진동만 추출
- **느린 구조 변형 감지** — 교량 · 철탑의 5 Hz 미만 기울기 변화

★ E계열과 D계열이 한 장비에 함께 있는 이유

E100 = "얼마나 흔들렸나" (동적 진동 · 충격의 크기와 주파수)
D40 = "어떤 방향으로 있었나" (자세 · 기울기 · 저주파 환경)
두 센서는 중복이 아니라 역할 분담입니다. E100만으로는 진동 크기는 알아도 방향을 모르고, E계열은 정지 상태에서 항상 0 g이므로 기울기 변화 자체를 감지할 수 없습니다.

4-4. 센서 선택 실전 판단표

측정 상황	추천 계열	이유
일반 진동 분석 (100 Hz 이상)	Piezoelectric (E)	낮은 노이즈, 높은 주파수 응답
저주파 진동 (100 Hz 미만)	Digital Capacitive (D)	DC 응답, 저주파 신뢰성
기울기 · 방향 · 자세 확인	Digital Capacitive (D)	중력 성분 상시 측정
고급 충격 시험 (펄스 분석)	Piezoresistive (R)	포화 없음, DC-coupled
넓은 대역 정밀 진동	E계열 + 알루미늄 케이스	S5 기준 2,000 Hz까지 응답
장기 무인 원격 모니터링	W8 (R계열 + Wi-Fi)	대용량 배터리, Cloud 자동 업로드

PART II

장비 운용

Preparation · Mounting · Configuration · Recording

- 측정 전 점검과 부착 방법 선정
- enDAQ Lab 설정 — 채널 · 트리거 · Wi-Fi
- 샘플레이트와 대역폭 결정 기준
- 측정 실행부터 데이터 회수까지

5. 측정 전 준비 현장 출발 전 점검과 부착

5-1. 장비 점검 체크리스트

항목	확인 사항	기준
✓ **배터리**	USB 연결 후 버튼을 눌러 LED로 잔량 확인	20 % 미만이면 충전 후 출발
✓ **저장 공간**	Lab에서 기록 가능 시간 확인	이전 데이터 백업 후 포맷
✓ **시계 동기화**	Set All Clocks 또는 Set device clock on exit	PC 시간과 동기화 필수
✓ **설정 확인**	샘플레이트 · 트리거 · 파일명 재확인	Export로 설정 파일 저장 권장
✓ **부착 도구**	볼트 규격 · 토크렌치 · 접착제 · 자석 마운트	S3 기준 70 in-oz 이하
✓ **케이블**	현장 USB 연결 케이블, 필요 시 노트북	데이터 회수용

5-2. 마운팅 방법과 주파수 응답

부착 방법은 고주파 응답에 직접 영향을 줍니다. **센서 사양보다 마운팅이 먼저 대역을 제한할 수 있습니다.**

마운팅 방법	권장 대역	용도
스터드 (볼트)	~ 10,000 Hz	진동 정밀 측정, SRS 시험
접착식	~ 5,000 Hz	현장 일반 진동 측정
자석 마운트	~ 1,500 Hz	빠른 현장 점검
핸드헬드	~ 500 Hz	정성적 참고 측정만

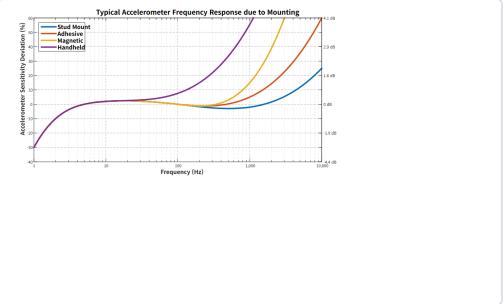

그림 5-1. 마운팅 방법별 주파수 응답 — Stud > Adhesive > Magnetic > Handheld

> ⚠ **자석 마운트로는 고주파를 신뢰할 수 없습니다**
>
> S3-E100D40의 대역폭이 1,000 Hz로 명시되어 있어도, 자석으로 부착하면 **1,500 Hz 부근에서 이미 오차가 커집니다.** 기어박스 · 베어링 결함처럼 고주파 성분을 봐야 하는 진단에서는 반드시 볼트 또는 접착식을 사용하십시오.

5-3. 부착 방향 확인 절차

1. D계열(Digital Capacitive) 채널에서 정지 시 **어느 축에 +1.0 g**가 표시되는지 확인
2. +1.0 g가 나오는 축이 중력 방향(하향) — 그 축이 수직으로 부착되었다는 뜻
3. Z 축을 수직으로 설계했다면 Z 축에 +1.0 g가 나와야 정상. X축에 1 g면 90° 틀어진 상태

6. enDAQ Lab 설정 장치 연결부터 트리거까지

6-1. 장치 연결

Lab 실행 후 **Device → Configure Device**를 선택하거나 "Configure a Recording Device" 버튼을 클릭합니다. USB로 연결하면 Select Recorder 창에 장치 목록이 뜨고, Type · Serial# · Status(Ready)를 확인한 뒤 Configure를 누릅니다.

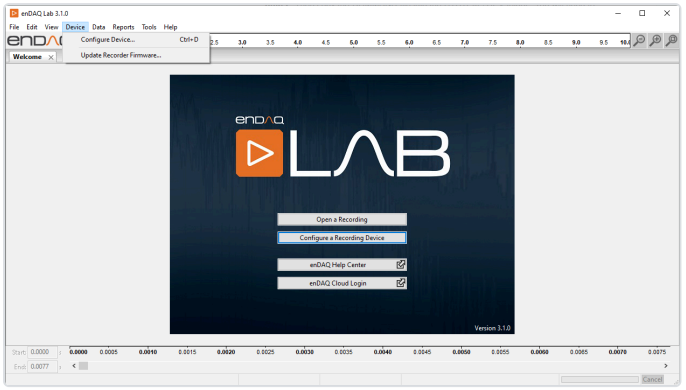

그림 6-1. enDAQ Lab 시작 화면

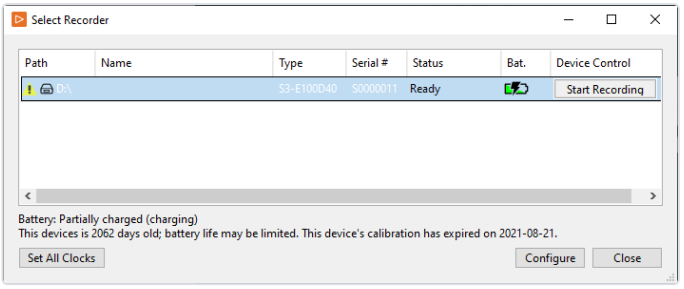

그림 6-2. Select Recorder — 장치 Ready 상태 인식

> ✅ **Start Recording 버튼**
> Select Recorder 화면의 Start Recording으로 즉시 기록을 시작할 수 있습니다. 다만 **Configure에서 설정을 먼저 확인한 뒤** 사용하십시오. 이전 측정의 설정이 그대로 남아 있을 수 있습니다.

6-2. General 탭 — 기본 설정

설정 항목	설명	권장 값
Device Name	장치 식별 이름	현장명_번호 (예: OkSan_01)
Recording File Prefix	데이터 파일 이름 접두사	날짜_현장명
Button Mode	버튼 동작 방식	Immediate Start/Stop
Local UTC Offset	현지 시간대	한국 : + 9.00 시간
Set device clock on exit	종료 시 PC 시간으로 동기화	✅ 항상 체크

> ⚠ **시계 동기화**
> 여러 대를 동시에 운용하거나 설비 운전 이력과 대조할 때 시각이 맞지 않으면 데이터 비교가 어렵습니다. 출고 전 **Set All Clocks**를 실행하십시오.

6-3. Measurements 탭 — 채널과 샘플레이트

각 센서 채널의 활성화 여부, 샘플레이트, Anti-aliasing Filter Cutoff를 설정합니다. **쓰지 않는 채널을 끄면 배터리와 저장 공간을 아낄 수 있습니다.**

채널	설정 포인트
주 가속도계 (Ch 8)	X/Y/Z 축 활성화, 샘플레이트 선택
DC 가속도계 (Ch 80)	Enable All Axes, 샘플레이트 별도 설정
온도·압력·습도 (Ch 59)	필요 항목만 개별 Enable
IMU (자세·방향)	Relative Orientation 권장
광 센서 (Ch 76)	포장 개봉 감지 등 특수 목적 시

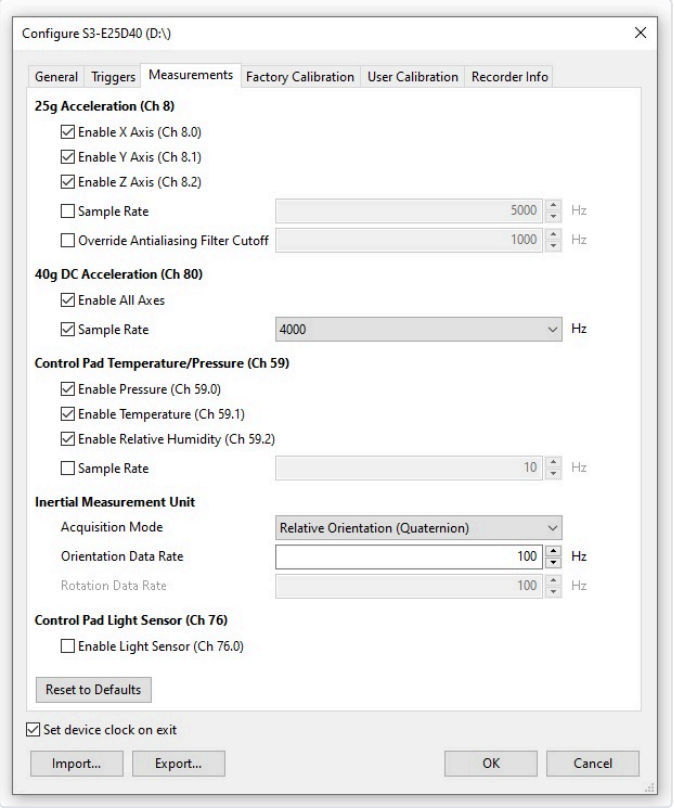

그림 6-3. Measurements 탭 — 채널별 샘플레이트 설정

IMU 측정 모드 선택

자이로 · 지자기는 **어떤 모드로 조합하느냐**가 결과를 결정합니다.

항목	Rotation	Relative Orientation	Absolute Orientation
핵심 질문	지금 얼마나 빠르게 도는가	출발 기준 얼마나 돌았는가	지구 기준 어느 방향인가
출력	각속도 (°/s)	쿼터니언 (시작점 기준)	쿼터니언 (지구 기준)
사용 센서	자이로	자이로 + 가속도계	자이로 + 가속도계 + 자력계
추가 소비	없음	1.5 mA	3 mA
드리프트	장시간 누적	장시간 시 발생 가능	거의 없음
권장 용도	회전 속도, 사행동 감지	**일반 현장 테스트 권장**	절대 방위각 필요 시

> **⚠ 철도 · 발전 설비에서는 Relative Orientation을 쓰십시오**
>
> 레일 귀선전류나 대형 모터의 강한 자기장이 **자력계를 간섭**합니다. Absolute Orientation은 자력계에 의존하므로 이런 환경에서 방위값이 흔들립니다. 자기장 간섭이 적은 곳에서만 Absolute를 사용하십시오.

6-4. Triggers 탭 — 트리거 설정

트리거는 **어떤 조건에서 기록을 시작할지** 정하는 기능입니다. 배터리와 저장 공간을 아끼면서 필요한 이벤트만 정확히 포착할 수 있습니다.

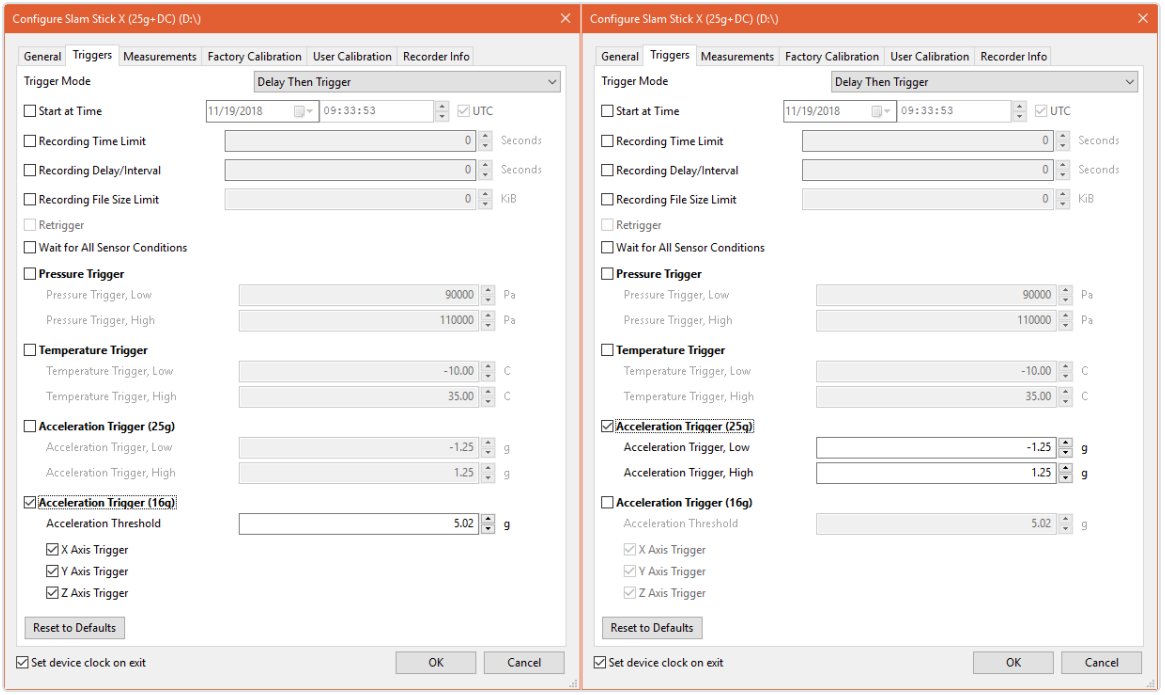

그림 6-4. Triggers 탭 — 좌: Acceleration Trigger (16 g), 우: Acceleration Trigger (25 g)

Trigger Mode

모드	동작 · 사용 시나리오
Delay Then Trigger	지연 후 트리거 대기 설치 후 진동 안정화를 기다릴 때
Immediate	전원 인가 즉시 기록 연속 기록, 테스트 환경
Time-based	지정 시각에 기록 시작 다채널 동시 측정 동기화

Acceleration Trigger 두 종류

종류	동작
Low / High	설정 범위를 벗어나면 트리거 예: −1.25 ~ +1.25 g 범위 이탈 시
Threshold	설정 임계값 이상 발생 시 트리거 예: 5.02 g 이상, 축 선택 가능

주요 설정 항목

설정 항목	내용	실전 값
Recording Time Limit	트리거 후 기록할 시간	0 = 무제한 / 충격 포착 시 1 ~ 5 초
Recording Interval	트리거 간 최소 간격	반복 이벤트 시 파일 수 조절용
File Size Limit	파일 크기 제한	0 = 무제한 (FAT32 4 GB 한계 주의)
Retrigger	기록 중 재트리거 허용	연속 이벤트 포착 시 체크
Pretrigger Samples	트리거 직전 데이터 포함 개수	100 ~ 500 samples
Wait for All Conditions	복수 조건 AND 적용	온도 + 가속도 동시 조건 시

★ 상황별 트리거 설정

충격 이벤트 포착 → Threshold를 예상 충격의 50 ~ 70 % 수준으로 / Time Limit 1 ~ 3 초 / Retrigger 체크 / Pretrigger 100 ~ 500 samples
연속 진동 모니터링 → Immediate 또는 Time-based / Time Limit 0 / File Size Limit로 파일 분할
환경 조건 감시 → Pressure · Temperature Trigger를 측정 범위 밖 값으로 설정

6-5. W-Series Wi-Fi 설정

W5 · W8은 Wi-Fi 탭이 추가됩니다. 기록 완료 후 **enDAQ Cloud로 자동 업로드**되므로 장비를 회수하지 않고도 원격지 데이터를 받을 수 있습니다.

설정 항목	설명
Wi-Fi Connection	무선 네트워크 연결 활성화
While Asleep / Triggering / Recording	각 상태에서 Wi-Fi 유지 여부 유지할수록 배터리 소모 증가
Upload recording to the cloud	기록 완료 후 Cloud 자동 업로드
Delete file after upload	업로드 후 장치 저장 공간에서 삭제 원격지 장기 운용 시 필요

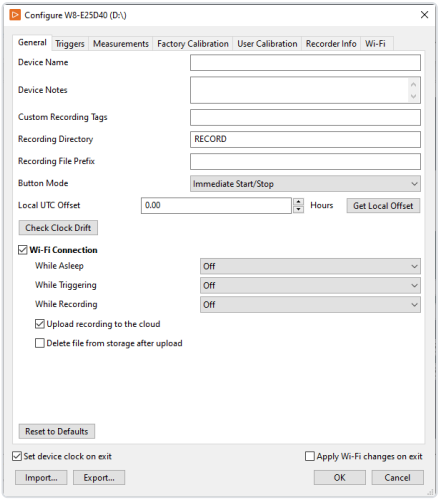

그림 6-5. W8 설정 창 — Wi-Fi 연결 및 Cloud 업로드

★ 원격 무인 운용 구성 예

W8을 원격지에 설치하고 **Delete file after upload**를 켜 두면, 저장 공간이 차서 기록이 멈추는 일 없이 무한정 운용할 수 있습니다. Wi-Fi는 **Recording 중에는 끄고 업로드 시에만 켜는** 설정이 배터리에 유리합니다. 주기 트리거와 조합하면 4,000 mAh 배터리로 최대 2년까지 현장에 둘 수 있습니다.

설정 파일 저장과 재사용

같은 조건으로 반복 측정하거나 여러 대를 동일하게 설정할 때는 **Export / Import** 기능을 사용합니다. 설정을 파일로 저장해 두면 현장에서 설정 실수를 줄이고, 다음 측정에서 동일 조건을 재현할 수 있습니다.

- Configure 창 하단의 **Export**로 현재 설정을 파일로 저장
- 다른 장비 연결 후 **Import**로 동일 설정 적용
- 현장 · 측정 목적별로 설정 파일을 만들어 관리하면 재현성이 확보됨

7. 샘플레이트와 대역폭 얼마나 빠르게 기록해야 하는가

샘플레이트는 1초에 몇 번 측정하는지를 나타냅니다. 측정 가능한 최고 주파수와 배터리 · 파일 크기가 모두 여기서 결정됩니다.

측정 가능한 최고 주파수 = 샘플레이트 ÷ 2

Nyquist 정리 — 예: 5,000 Hz 샘플링 → 이론상 2,500 Hz까지

샘플레이트	Nyquist 한계	실제 유효 대역 (AA 필터 적용 후)	배터리 소모	파일 크기
100 Hz	50 Hz	~ 20 Hz	매우 적음	작음
1,000 Hz	500 Hz	~ 200 Hz	적음	보통
5,000 Hz	2,500 Hz	~ 1,000 Hz	보통	큼
10,000 Hz	5,000 Hz	~ 2,000 Hz	높음	매우 큼
20,000 Hz	10,000 Hz	~ 4,000 Hz	가장 높음	최대

7-1. "대역폭이 1,000 Hz인데 20,000 Hz로 기록할 이유가 있나요?"

자주 받는 질문입니다. S3-E100D40의 공식 대역폭은 약 1,000 Hz입니다. 그런데도 샘플레이트를 높여야 하는 이유가 네 가지 있습니다.

이유	내용
① 충격 피크 정확도	0.5 ~ 5 ms 짧은 충격은 샘플링이 낮으면 피크를 지나칩니다. 100 g / 1 ms 충격을 1,000 Hz로 샘플링하면 **40 ~ 60 g로 측정**될 수 있습니다.
② AA 필터 여유 확보	기본 AA 필터 = 샘플레이트 ÷ 5. 1,000 Hz 분석이 목적이면 최소 5,000 Hz로 기록해야 필터가 분석 대역 밖으로 밀려납니다.
③ 충격 파형 형태 보존	SRS · PVSS는 파형의 상승 시간과 대칭성에 민감합니다. 샘플링이 낮으면 파형이 계단 모양으로 뭉개져 결과 자체가 달라집니다.
④ 후처리 유연성	높게 기록한 뒤 다운샘플링은 가능하지만, 낮게 기록한 데이터를 업샘플링해 정보를 복원할 수는 없습니다.

상황별 권장 샘플레이트

상황	권장 샘플레이트	이유
1,000 Hz 이하 진동 분석	2,000 ~ 5,000 Hz	Nyquist 여유율, AA 필터 이후 대역 보장
충격 이벤트 포착	10,000 ~ 20,000 Hz	상승 시간과 피크를 정확히 포착
장기 모니터링 (배터리 우선)	500 ~ 1,000 Hz	필요 대역이 500 Hz 미만인 경우
정밀 진동 (S5 · W8 알루미늄)	5,000 ~ 20,000 Hz	케이스 대역폭이 넓어 고속 샘플링 활용 가능

★ 실무 기준

분석하려는 최고 주파수 × 5가 안전한 샘플레이트입니다. 1,000 Hz 분석 → 5,000 Hz / 2,000 Hz 분석 → 10,000 Hz / 충격 피크 정확도가 최우선이면 10,000 ~ 20,000 Hz.

7-2. Anti-aliasing 필터 설정

AA 필터는 Nyquist보다 높은 주파수 성분이 데이터에 섞여 **허위 신호(Aliasing)**를 만드는 것을 막는 저역통과 필터입니다. Lab에서 Override를 체크하지 않으면 자동으로 설정됩니다.

기본 Anti-aliasing Filter Cutoff = 샘플레이트 ÷ 5

예: 5,000 Hz 샘플링 → 1,000 Hz에서 −3 dB (차단 시작)

이는 매우 보수적인 설정으로, Nyquist(2,500 Hz)보다 훨씬 낮은 곳에서 필터링됩니다. **실제 유효 분석 대역은 AA 필터 cutoff의 약 70 ~ 80 %**입니다.

샘플레이트	기본 AA Cutoff (SR ÷ 5)	실제 분석 대역	Override가 필요한 경우
1,000 Hz	200 Hz	~ 160 Hz	200 Hz 이상 분석이 필요할 때
5,000 Hz	1,000 Hz	~ 800 Hz	1,000 Hz 이상 분석 시
10,000 Hz	2,000 Hz	~ 1,600 Hz	2,000 Hz 이상 분석 시
20,000 Hz	4,000 Hz	~ 3,200 Hz	4,000 Hz 이상 분석 시

Override 설정 지침

시나리오	Override Cutoff	주의사항
표준 진동 분석 (PSD 목적)	Override 불필요	기본값이 aliasing 방지에 최적화
고주파 포함 분석 (기어박스 · 드릴 헤드)	SR × 0.4 ~ 0.45	필터가 높아질수록 aliasing 위험 증가
충격 파형 분석 (SRS / PVSS)	SR × 0.4 ~ 0.45 (최대 SR × 0.5)	파형 상승 시간 보존을 위해 cutoff 상향
저주파 모니터링 (구조물)	Override 불필요	샘플레이트 자체를 낮추는 것이 효율적

⚠ Override를 SR × 0.5 이상으로 올리지 마십시오

AA Cutoff를 Nyquist(SR ÷ 2)보다 높게 설정하면 **aliasing된 허위 주파수 성분**이 데이터에 포함됩니다. 실제로 존재하지 않는 주파수에 피크가 나타나 진단 자체가 잘못될 수 있습니다. 특별한 이유 없이 기본값을 바꾸지 마십시오.

Aliasing이 실제로 일으키는 문제

- **없는 주파수에 피크가 생김** — 기어박스 진단에서 존재하지 않는 결함 주파수로 오판
- **진짜 피크가 가려짐** — 접혀 들어온 고주파 성분이 실제 신호를 덮음
- **사후 제거 불가** — 기록 시점에 섞여 들어간 성분은 소프트웨어로 분리할 수 없음

8. 측정 실행 · 데이터 회수 현장 기록부터 백업까지

8-1. 측정 시작 방법

방법	절차	특징
버튼 시작	장비 버튼을 누르면 기록 시작 (Trigger Mode에 따라 즉시 또는 대기)	현장 즉시 시작, 가장 간단
Lab 원격 시작	Select Recorder 창에서 Start Recording	USB 연결 상태에서 즉시 시작
Time-based 트리거	설정된 날짜 · 시각에 자동 시작	다수 장비 동시 측정 동기화
Sensor 트리거	가속도 · 온도 · 압력 조건 초과 시 자동	이벤트 포착 자동화

8-2. 데이터 회수 절차

1. 측정 완료 후 버튼을 눌러 기록 정지 (또는 트리거 조건 종료 대기)
2. USB 케이블로 PC에 연결 — 탐색기에서 USB 드라이브로 인식됨
3. **RECORD 폴더**의 모든 **.ide** 파일을 PC에 복사 (원본 보존 우선)
4. 복사 완료 확인 후 enDAQ Lab에서 파일을 열어 데이터 정상 여부 확인
5. 2개 이상 경로에 백업이 끝난 뒤에만 장비에서 삭제

> **⚠ 원본 삭제 전 반드시 이중 백업**
> IDE 원본 파일이 가장 중요한 자산입니다. 정밀 캘리브레이션 정보가 들어 있어 나중에 재분석할 때 반드시 필요합니다. **로컬 + 백업 드라이브(또는 Cloud)** 두 곳에 복사가 끝나기 전에는 장비에서 지우지 마십시오.

8-3. 측정 중 LED 확인

측정 중에는 LED로 장비 상태를 빠르게 확인할 수 있습니다. 전체 LED 패턴과 각 패턴의 의미는 **14 장 문제해결**에 정리되어 있습니다.

LED	상태
녹색 간헐 깜박임	트리거 조건 대기 중 — 정상
녹색 빠른 깜박임	데이터 기록 진행 중
적색 빠른 깜박임	오류 — 설정 · 저장 공간 · 센서 이상
청색 점등	USB 데이터 전송 중 — **분리 금지**

PART III

데이터 관리

IDE Format · Conversion · Python Processing

- IDE 원본 형식과 보존 원칙
- FAT32 4 GB 제한과 대응
- TXT · MAT · MDF 변환
- 고객 요구에 맞춘 분석 소프트웨어 지원

9. IDE 파일 형식과 관리 원본 보존과 변환

IDE(Instrumented Data Exchange)는 enDAQ 전용 이진 파일 형식입니다. 모든 채널 데이터 · 타임스탬프 · 메타데이터(캘리브레이션, 설정값)가 **하나의 파일**에 담깁니다.

특징	설명
원본 충실도	측정된 모든 정보를 손실 없이 보존 — TXT/CSV 변환 시 일부 메타데이터 손실
압축 효율	대용량 가속도 데이터를 효율적으로 저장
호환성	enDAQ Lab · idelib(Python) · enDAQ Cloud에서 직접 처리
파일 명명	recording_YYYYMMDD_HHMMSS.ide (설정에 따라 변경 가능)

9-1. FAT32 4 GB 파일 제한

enDAQ는 FAT 32 파일 시스템을 사용하므로 **단일 파일이 4 GB를 넘을 수 없습니다.** 한계에 도달하면 장비가 자동으로 새 파일에 이어 기록합니다 — 정상 동작입니다.

샘플레이트	4 GB 도달 예상 시간	대응 방법
100 Hz	수 주	제한 없이 연속 기록 가능
1,000 Hz	수 일	정기적 데이터 회수 계획 수립
5,000 Hz	~ 63 시간	1 ~ 2일마다 회수 권장
20,000 Hz	~ 17 시간	매일 회수 또는 File Size Limit 설정

9-2. 변환 형식

형식	특징	사용 시나리오
TXT / CSV	텍스트 형식, 시간과 데이터값	Excel, 범용 소프트웨어로 가져오기
MDF	ASAM MDF v4 — 자동차 산업 표준	CANalyzer 등 차량 분석 소프트웨어
MAT	MATLAB 호환 형식	MATLAB / Octave 분석

> ✅ **변환 후에도 IDE 원본은 반드시 남기십시오**
> IDE에는 센서별 정밀 캘리브레이션 정보가 들어 있습니다. TXT로 변환한 데이터만 남기면 나중에 다른 방식으로 재분석할 때 **보정 계수를 복원할 수 없습니다.** 변환 파일은 작업본, IDE는 원본으로 관리하십시오.

10. 분석 소프트웨어 지원 고객 요구에 맞춘 분석 화면 제공

측정 데이터를 직접 분석하려면 신호 처리와 프로그래밍 지식이 필요합니다. 유센스는 고객이 **확인하려는 결과에 맞춰 분석 소프트웨어를 제작해 제공**합니다. 사용자는 측정한 IDE 파일만 올리면 정해진 형식의 결과를 확인할 수 있습니다.

STEP 1
분석 요구 전달
확인하려는 결과와 판정 기준, 적용 규격을 기술자료로 전달해 주십시오.

STEP 2
소프트웨어 제작
요구에 맞춘 분석 로직과 결과 화면을 유센스가 구성해 제공합니다.

STEP 3
측정 파일 업로드
이후 측정에서는 IDE 파일만 올리면 동일한 형식으로 결과가 출력됩니다.

구성 예시 — 전동차 바닥 승차감 분석

객실 바닥에 센서를 부착해 측정한 IDE 파일을 올리면, 승차감 지표와 구간별 판정 결과가 정해진 형식으로 출력되도록 구성한 예입니다.

※ 위 화면은 구성 예시이며, 실제 화면은 고객이 요구한 분석 항목에 맞추어 제작됩니다.

제공 범위	내용
분석 항목 구성	요구하신 지표 · 판정 기준 · 적용 규격에 맞춰 계산 로직을 구성합니다
결과 화면	지표 요약, 시계열 · 주파수 그래프, 구간별 판정 표 등 필요한 형태로 구성합니다
출력 형식	화면 조회 외에 보고서 · 엑셀 등 요청하신 형식으로 내보낼 수 있습니다
운용 지원	측정 조건이 바뀌거나 판정 기준을 조정할 때 분석 로직 수정을 지원합니다

PART IV

분석 개념

PSD · SRS · PVSS

- PSD — 진동의 주파수별 에너지 분포
- FFT와 PSD의 차이와 사용 구분
- SRS — 충격이 구조물에 주는 응답
- PVSS — 충격의 손상 잠재력 평가

11. PSD — 전력 스펙트럼 밀도 진동이 어느 주파수에서 강한가

PSD는 시간 영역의 가속도 파형을 주파수 영역으로 변환해 **어떤 주파수 성분이 지배적인지** 보여주는 그래프입니다. 기계 상태 진단의 기본 도구입니다.

11-1. 시간 파형과 PSD의 역할 차이

비교 항목	시간 파형 (Time Domain)	PSD (Frequency Domain)
x축 / y축	시간 (s, ms) / 가속도 (g)	주파수 (Hz) / $g^2 \cdot Hz^{-1}$ 또는 dB
알 수 있는 것	이벤트 발생 시각, 충격 크기, 파형 형태	어떤 주파수가 강한지, 공진 주파수
알기 어려운 것	어떤 주파수 성분인지	이벤트가 언제 일어났는지
주요 용도	충격 분석, 이벤트 타이밍 파악	진동 특성 파악, 기계 상태 진단

11-2. 계산 방법 — Welch 방법

enDAQ Lab과 Python이 사용하는 방식입니다. 긴 신호를 나눠 평균함으로써 **노이즈를 줄이고 결과를 안정화**합니다.

1. 긴 시계열을 여러 개의 짧은 구간(Segment)으로 분할
2. 각 구간에 Window 함수(기본 Hanning) 적용 — 구간 끝단 왜곡(spectral leakage) 감소
3. 각 구간의 FFT 계산
4. 모든 구간의 결과를 평균 → 노이즈 감소, 스펙트럼 안정화

파라미터	영향	권장 설정
Segment 길이	길수록 주파수 분해능 향상, 짧을수록 평균 횟수 증가	분석 목적 분해능에 따라 결정
Window 함수	구간 끝단 왜곡 감소	Hanning (기본) 또는 Flat-top
Overlap	구간 간 겹치는 비율	50 % (Welch 권장)
Scaling	density : g^2/Hz / spectrum : g^2	연속 진동 → density, 임펄스 → spectrum

✅ **PSD 단위 읽는 법**

g^2/Hz — 단위 주파수당 가속도 파워. 어떤 주파수 구간을 적분하면 그 대역의 **RMS^2**가 됩니다. 즉 "이 대역이 전체 진동에 얼마나 기여하는가"를 정량화할 수 있습니다.

dB 표기 — $10 \times \log_{10}(PSD)$ 로 변환. 넓은 동적 범위를 한 화면에 표현할 때 사용합니다. **3 dB 증가 = 에너지 2배**라는 점을 기억하십시오.

11-3. FFT와 PSD — 언제 무엇을 쓰는가

현장에서 가장 자주 혼동하는 부분입니다. 두 방법은 목적이 다릅니다.

구분	FFT	PSD (Welch)
계산 방식	전체 신호를 한 번에 변환	여러 구간으로 나눠 FFT 후 평균
단위	g (진폭)	g^2/Hz (에너지 밀도)
결과 안정성	들쭉날쭉, 노이즈에 민감	안정적, 재현성 높음
피로 분석	불가 (진폭만 제공)	**가능** — 적분 → RMS^2 → 피로 수명 예측
주 사용처	단발 충격의 주파수 성분 확인	랜덤 진동 분석 · 상태 진단 기본

11-4. PSD 그래프 해석

그래프 특징	의미	대응
특정 주파수에 날카로운 Peak	공진 주파수 또는 기계적 고유 주파수	구조 고유 주파수 파악 → 공진 회피
광대역 에너지 증가	마모 · 불균형 · 베어링 손상 복합 신호	진행성 손상 가능성 → 추세 모니터링
저주파 에너지 지배	언밸런스, 미스얼라인먼트, 구조 진동	저속 회전 기계 문제 점검
고주파 에너지 지배	베어링 내부 결함, 기어 치 결함	고속 기계 정밀 진단 필요
전체 에너지 상승	측정 환경 변화 또는 실제 진동 증가	측정 조건 재확인 후 판단

★ 절대값이 아니라 변화를 보십시오

PSD 값이 얼마여야 정상인지에 대한 보편적 기준은 없습니다. 설비마다, 부착 위치마다 다릅니다.
실무에서 의미 있는 것은 **같은 설비 · 같은 위치 · 같은 조건에서 측정한 이전 데이터와의 차이**입니다. 새 장비를 도입했거나 정비를 마친 직후에 **기준(Baseline) PSD**를 측정해 보관하십시오. 이후 모든 판단의 출발점이 됩니다.

분석 대역 설정 시 확인 사항

- **마운팅 대역을 넘지 않는가** — 자석 부착 상태에서 3,000 Hz 피크를 논하는 것은 의미가 없습니다
- **AA 필터 안쪽인가** — 기본 설정이면 실제 유효 대역은 샘플레이트 ÷ 6 수준입니다
- **센서 대역폭 안쪽인가** — S3는 1,000 Hz, S5 · W8은 2,000 Hz가 한계입니다

12. SRS / PVSS 충격이 구조물에 무엇을 하는가

SRS(충격 응답 스펙트럼)는 충격 이벤트가 **서로 다른 고유 주파수를 가진 구조물에 얼마나 큰 응답을 일으키는지**를 주파수별로 나타낸 지표입니다.

12-1. SRS는 무엇을 계산하는가

하나의 충격 파형을 수백 개의 가상 1자유도 스프링-질량 시스템에 입력합니다. 각 시스템은 서로 다른 고유 주파수(10 Hz, 100 Hz, 1,000 Hz ...)를 갖습니다. **각 시스템이 겪은 최대 응답 가속도**를 해당 주파수 위치에 찍은 그래프가 SRS입니다.

> **★ SRS의 X축은 측정값이 아닙니다**
>
> X축은 Raw 데이터에서 직접 추출한 주파수가 아니라, **알고리즘이 시뮬레이션한 가상 구조물의 고유 주파수**입니다.
>
> 실용법 : SRS를 계산한 뒤 **내 부품의 고유 주파수**를 X축에서 찾아 그 위치의 Y값(최대 응답 g)을 읽습니다. 이 값이 부품의 내구 한계를 넘는지가 판단 근거가 됩니다.

12-2. PSD와 SRS의 차이

비교 항목	PSD	SRS
입력 신호	연속 진동 (긴 시계열)	충격 이벤트 (짧은 펄스)
y축 물리량	g^2/Hz (에너지 밀도)	g(최대 응답 가속도)
x축	측정된 주파수 (Hz)	가상 구조물의 고유 주파수 (Hz)
알 수 있는 것	진동의 주파수 분포와 에너지	충격이 구조물에 가하는 응력 잠재력
주요 적용	기계 진동 진단, 피로 분석	충격 시험 규격, 충격 내성 평가
규격 예시	MIL-STD-810, IEC 60068	MIL-STD-810 Method 516.8, ASTM D3332

FFT로는 왜 안 되는가 — 공진 증폭

구분	FFT	SRS
분석 대상	충격 신호에 포함된 주파수 성분 (입력)	충격을 받은 구조물의 최대 응답 (출력)
공진 증폭	미반영 — 시간 평균으로 피크 소실	**반영** — Q=10 기준 최대 10배 증폭
PVSS 산출	불가	가능

> **⚠ FFT에서 100 g로 보인 충격이 구조물에는 800 g로 작용할 수 있습니다**
>
> Q = 10인 구조물에서는 공진 주파수의 에너지가 집중 증폭되어 SRS상 **최대 800 ~ 1,000 g**로 나타납니다. FFT는 이 최악의 순간값을 평균으로 지워버립니다. 부품이 실제로 견뎌야 하는 값을 알려면 SRS로 계산해야 합니다.

12-3. 계산 파라미터

파라미터	설명	일반 설정
주파수 범위	계산할 고유 주파수 범위	10 ~ 2,000 Hz (1/6 옥타브 간격)
감쇠비 (Q 또는 ζ)	시스템 감쇠 특성 — Q = 1 / (2ζ)	**Q = 10 (ζ = 0.05)** — 대부분 규격의 표준
SRS 유형	Maximax : 양방향 최대 / Maxi+ : 정방향 / Maxi− : 역방향	Maximax (보수적 평가)

12-4. PVSS — 손상 잠재력 평가

PVSS는 SRS의 변형으로, 충격이 구조물에 가하는 **응력(Stress)과 더 직접 연관된** 지표입니다. SRS가 "얼마나 세게 흔들리나"라면, PVSS는 "그 충격이 구조물을 얼마나 손상시킬 수 있나"를 보여줍니다.

$$PVSS = 2\pi \times f_n \times x_{max} \quad = \quad SRS \div (2\pi \times f_n)$$

구조물 응력 ∝ 변위 ∝ PVSS | f_n = 고유 주파수

비교	SRS	PVSS
물리량	최대 응답 가속도 (g)	최대 의사속도 (in/s 또는 m/s)
손상 연관성	간접적	**직접적** (응력에 비례)
주요 규격	MIL-STD-810, 방위산업	포장 · 운송 충격 (ASTM D3332 등)
그래프 특징	고주파에서 빠르게 상승	중주파 대역에서 최대값 형성

> **★ PVSS 50 in/s 기준선**
> 경험적으로 **PVSS 50 in/s를 넘는 주파수 구간**은 구조 손상 위험 구간으로 판단합니다. 충격 시험 후 PVSS 곡선에서 이 선을 넘는 구간이 있는지, 그 주파수가 실제 부품의 고유 주파수와 겹치는지를 확인하십시오.

언제 무엇을 쓰는가

목적	사용 지표
장비 · 부품이 충격 규격(MIL-STD-810, IEC 60068)을 만족하는지 평가	**SRS**
충격이 구조물에 실질적 손상을 줄 수 있는지, 안전 마진 평가	**PVSS**
연속 진동 환경의 피로 수명 예측	**PSD**

enDAQ Lab에서 **Shock 탭**을 선택하면 SRS와 PVSS가 자동 계산되어 그래프로 표시됩니다. Python에서는 `calc.shock.shock_spectrum()` · `calc.shock.pseudo_velocity()`로 계산합니다.

PART V

실사용 사례

Industry · Automotive · Aerospace · Infrastructure

- 여섯 분야 적용 사례 요약
- 기어박스 상태 감시 — PSD 결함 주파수 진단
- 드릴 헤드 충격 분석 — SRS / PVSS 심각도 평가

13. 적용 사례 개요 여섯 분야에서의 실제 운용

enDAQ가 실제로 적용된 사례입니다. **측정 목적에 따라 장비 · 샘플레이트 · 분석 방법이 달라집니다.** 이어지는 두 절에서 대표 사례 두 건을 상세히 다룹니다.

분야	적용 대상	장비 · 설정	분석 방법	핵심 관찰
자동차	차량 엔진 진동	S3-E100D40 5,000 Hz	시간 파형 PSD · 스펙트로그램	운전 조건별 진동 특성 비교 실린더 점화 주파수와 하모닉
산업	**드릴 헤드 충격**	**S3-E500 20,000 Hz · 50 g 트리거**	**SRS / PVSS**	**반복 충격 최대 ~200 g 충격 심각도와 부품 수명 → 34 p**
산업	**기어박스 상태 감시**	**S3-E100D40 10,000 Hz · 주 1회**	**PSD 피크 추세**	**GMF · 베어링 결함 주파수 정상 대비 증가량 판정 → 32 p**
물류 · 환경	수거 · 재활용 트럭	S3-E100D40	시간 파형 DC offset 추적	충격 이벤트 크기와 빈도 DC 성분으로 뒤집힘 시점 확인
인프라	교량 열차 통과	S3-E100D40 500 ~ 1,000 Hz	저주파 구조 응답 시계열	D계열로 1 ~ 20 Hz 구조 응답 고유 주파수 변화 = 구조 변화 신호
항공	화물칸 진동 환경	S3-E25D40 5,000 Hz	PSD 비행 단계별 프로파일	이륙 · 순항 · 난기류 · 착륙별 진동 프로파일 → 포장 규격 설계

사례에서 공통으로 확인되는 것

관찰	의미
측정 목적이 샘플레이트를 결정한다	충격 심각도 평가는 20,000 Hz, 저주파 구조 응답은 500 ~ 1,000 Hz. 무조건 높게 잡으면 배터리만 소모합니다.
E계열과 D계열을 함께 본다	트럭 사례에서 충격 크기는 E100, 화물이 뒤집힌 시점은 D40의 DC offset으로 확인했습니다.
추세가 절대값보다 중요하다	기어박스 사례는 1회 측정이 아니라 주 1회 정기 측정의 변화량으로 판정합니다.
규격과 비교할 수 있어야 한다	드릴 헤드는 MIL-STD-810, 항공 화물은 RTCA DO-160 기준과 대조해 시험 수준을 결정했습니다.

13-1. 기어박스 상태 감시 — 결함 주파수 진단

기어 치 결함 · 베어링 손상 · 불균형은 **특정 주파수**에서 진동으로 나타납니다. 무작위가 아니라 회전 속도와 기어 구조에서 **계산할 수 있는 주파수**입니다.

항목	내용
장비	e nDAQ S3-E100D40
부착 위치	기어박스 하우징 (베어링 하중 경로에 가까운 면)
샘플레이트	10,000 Hz — 기어 치 주파수 포착
마운팅	스터드 또는 접착식 **필수**
측정 주기	정기 측정 (주 1회) → 추세 비교
분석 목표	결함 주파수 감지, 이상 발생 시점 파악

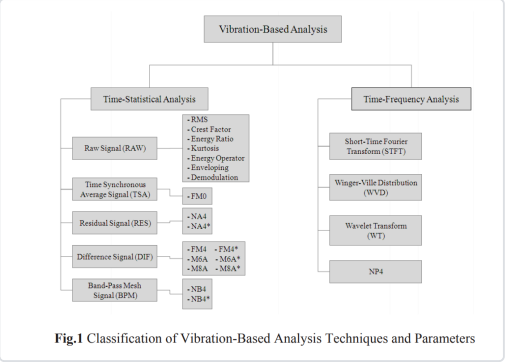

Fig.1 Classification of Vibration-Based Analysis Techniques and Parameters

그림 13-1. 진동 기반 분석 기법 분류
e nDAQ Lab 직접 지원 : PSD · Spe ctrogram · SRS · PVSS

결함 주파수 계산식

결함 유형	계산식	판독
기어 치 메시 주파수 (GMF)	GMF = RPM / 60 × 기어 치 수	정상에서도 존재 — **크기 추세**를 봄
GMF 하모닉	GMF × 2, × 3, …	과도하면 기어 치 불균형 또는 손상
베어링 외륜 (BPFO)	BPFO = (n/2) × RPM/60 × (1 − d/D·cos α)	외부 레이스 손상
베어링 내륜 (BPFI)	BPFI = (n/2) × RPM/60 × (1 + d/D·cos α)	내부 레이스 손상
롤링 요소 (BSF)	BSF = (D/2d) × RPM/60 × (1 − (d/D·cos α)²)	볼 · 롤러 자체 손상

n = 롤링 요소 개수 · d = 롤링 요소 직경 · D = 피치 직경 · α = 접촉각

> **★ 측정 전에 계산부터 하십시오**
>
> 기어박스 RPM과 기어 치 수를 먼저 확인해 **GMF를 계산**하고, 베어링 제원으로 BPFO · BPFI · BSF를 구합니다. 그 주파수들이 어디에 나타나야 하는지 알고 PSD를 보는 것과, 그래프를 먼저 보고 해석하려는 것은 전혀 다릅니다. 계산된 주파수가 **마운팅 대역과 AA 필터 안쪽인지**도 함께 확인하십시오.

PSD 분석 워크플로우

1. 기어박스 RPM과 기어 치 수를 확인해 **GMF 계산**
2. enDAQ Lab 또는 Python에서 PSD 계산
3. PSD 그래프에서 GMF 및 하모닉 위치 확인
4. 각 피크의 크기를 **이전 측정과 비교** → 증가 추세 파악
5. 베어링 결함 주파수를 계산해 해당 위치의 피크 확인
6. 사이드밴드(GMF ± 회전 주파수) 출현 여부 확인 → 변조 = 국부 결함

정상과 이상의 판정 기준

관찰 항목	정상 기어박스	이상 기어박스
GMF 피크	존재하나 크기가 안정적	이전 대비 **3 dB 이상 증가** 시 주의
고차 하모닉 (×2, ×3)	작거나 거의 없음	증가하면 기어 치 손상 가능성
사이드밴드 (GMF ± RPM)	없거나 매우 작음	출현하면 모듈레이션 — 국부 결함 신호
광대역 노이즈	낮고 평탄	증가하면 전반적 마모 또는 윤활 문제
베어링 결함 주파수	없음	BPFO · BPFI · BSF 위치에 피크 출현

★ 상태 감시의 네 가지 원칙

① **추세 모니터링** — 1회 측정의 절대값이 아니라 이전 측정 대비 변화량을 봅니다.
② **Baseline 확보** — 새 장비 도입 또는 정비 직후에 기준 PSD를 측정해 보관합니다.
③ **특정 주파수 집중** — 광대역 전체가 아니라 GMF와 베어링 결함 주파수에 집중합니다.
④ **3 dB 규칙** — 피크가 이전 대비 3 dB 이상 증가하면 주의, **6 dB 이상이면 즉시 점검**합니다.

측정 조건을 고정해야 하는 이유

추세 비교가 성립하려면 매 측정의 조건이 같아야 합니다. 다음 항목은 **측정 때마다 동일하게** 유지하십시오.

고정 항목	달라지면 생기는 문제
부착 위치 · 방향	전달 경로가 바뀌어 크기 비교 자체가 무의미해집니다
마운팅 방법	자석 ↔ 스터드가 바뀌면 고주파 대역 응답이 달라집니다
샘플레이트 · AA 필터	분석 대역이 달라져 같은 주파수의 값이 변합니다
설비 운전 조건	부하 · RPM이 다르면 GMF 위치와 크기가 함께 이동합니다

설정 파일을 **Export**해 두고 매 측정에 **Import**하면 조건 재현이 간단해집니다(6-5 참조).

13-2. 드릴 헤드 충격 분석 — SRS / PVSS 심각도 평가

광산 드릴 헤드는 **매우 강한 반복 충격**이 발생하는 환경입니다. 충격 이벤트를 기록하고 SRS · PVSS로 심각도(Severity)를 평가해 부품 수명을 예측합니다.

항목	내용
장비	enDAQ S3-E500 (±500 g)
부착 위치	드릴 바디 측면 — 스터드 마운트
샘플레이트	20,000 Hz — 충격 파형 정밀 포착
트리거	Acceleration Threshold **50 g 이상**
Pretrigger	충격 직전 신호 포함 (인과관계 분석)
분석 목표	충격 severity 평가, 부품 수명 예측

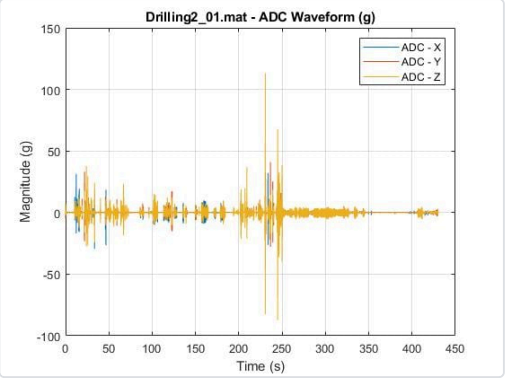

그림 13-2. 반복 충격 시간 파형 — 전체 측정 구간

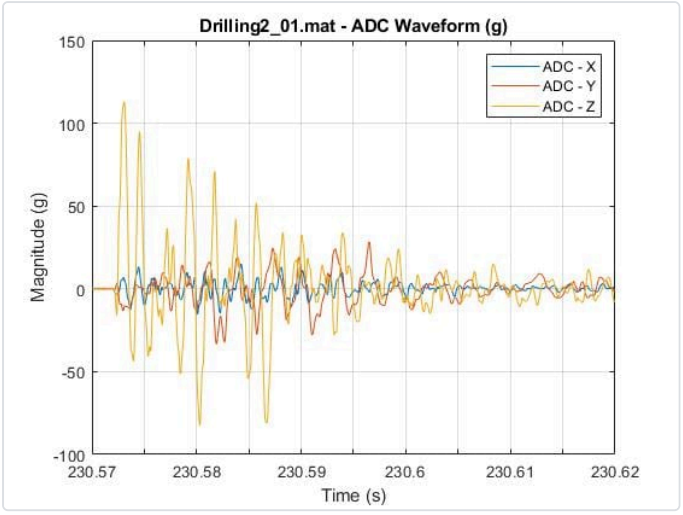

그림 13-3. 최대 충격 이벤트 확대 (t ≈ 230.6 s)

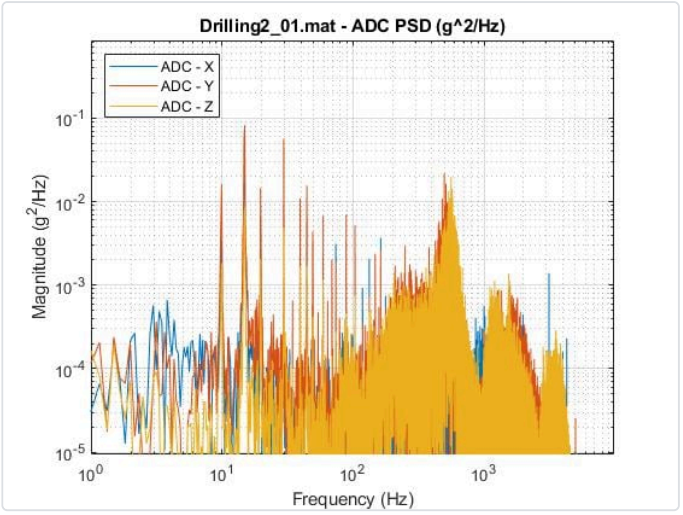

그림 13-4. 충격 구간 PSD — 주파수 에너지 분포

분석 결과와 해석

분석 지표	관찰 결과	실용적 의미
시간 파형	반복 충격 이벤트, 최대 ~200 g	충격 간격과 크기 분포 파악
SRS 피크	공진 주파수에서 응답 증폭 확인 Q=10 기준 입력 대비 증폭 배율 산출	드릴 구조물의 공진 주파수와 충격 심각도 판정
PVSS	최대 의사속도 산출 **50 in/s 기준선** 초과 구간 확인	구조물 응력 손상 잠재력 평가
규격 비교	MIL-STD-810 충격 규격과 대조	부품 충격 내성 검증 여부 판단

★ 이 사례에서 압전(E) 센서를 쓴 이유와 한계

±500 g 범위에 최대 200 g 충격이므로 **범위 초과 포화는 없습니다.** 다만 드릴 충격의 펄스 폭이 1 ms 보다 짧아지는 구간이 있다면 charge amplifier 포화로 파형이 왜곡될 수 있습니다. 파형 자체가 판정 기준인 **인증 시험 수준**이라면 압저항(R계열) — W8-R100D40 또는 S5-R500D40을 권장합니다. 포화가 구조적으로 없고 0 Hz부터 응답해 충격 직전부터 회복까지 전 구간을 왜곡 없이 기록합니다(3-2 · 4-2 참조).

14. 일반 문제해결 증상별 원인과 조치

14-1. 측정 관련

증상	가능한 원인	조치
데이터 파일이 생성되지 않음	트리거 조건 미발생 또는 기록 시작 누락	트리거 임계값이 너무 높지 않은지 확인 Immediate 모드로 전환해 테스트
파형이 평평하게 잘림 (클리핑)	측정 범위 초과 포화	더 큰 범위로 교체 (E100 → E500 → E2000)
파형이 뒤틀리거나 드리프트 발생	압전 charge amp 포화	**압저항(R계열) 센서 검토** 범위를 키워도 해결되지 않음
허위 주파수 성분 등장	Aliasing— AA 필터 설정 부족	샘플레이트 증가 또는 AA Filter Cutoff Override 제거
특정 축만 데이터 없음	채널 비활성화 또는 센서 이상	Lab에서 해당 축 Enable 여부 확인
파일이 4 GB에서 끊김	FAT32 한계 — 자동으로 새 파일 생성	정상 동작. 파일 번호 순서대로 이어 분석

14-2. 소프트웨어 관련

증상	가능한 원인	조치
장치가 Lab에서 인식되지 않음	USB 케이블 불량, 드라이버 문제	다른 포트 · 케이블 시도 / Lab 재시작
Configure 버튼 비활성화	장치가 현재 기록 중	기록 정지 후 재연결
IDE 파일이 열리지 않음	파일 손상 또는 버전 불일치	다른 PC에서 시도 / Lab 최신 버전 업데이트
설정이 저장되지 않음	Write protection	파일 쓰기 권한 확인

14-3. 배터리 관련

증상	원인	조치
충전이 안 됨	극한 온도 환경	**0 ~ 45 °C** 범위에서 충전 재시도
배터리 수명이 사양보다 짧음	고 샘플레이트, 다채널 활성화	샘플레이트를 낮추거나 불필요 채널 비활성화
장기 보관 후 부팅 안 됨	완전 방전	충전기 연결 후 30분 이상 대기 후 부팅

14-4. LED 상태 패턴

enDAQ 하드웨어는 **LED 색상과 점멸 패턴**으로 동작 상태와 배터리 상태를 표시합니다. 현장에서 이상을 판단하는 1차 수단이므로 패턴별 의미를 숙지하십시오.

동작 상태 LED

상황	LED 동작	설명
정상 대기 (트리거 설정)	녹색 간헐 깜박임	트리거 조건 대기 중 — 정상 동작
기록 중 (연속)	녹색 빠른 깜박임	데이터 기록 진행 중
기록 완료	LED 소등 후 짧게 점등	기록 정상 종료
오류 · 이상	**적색 빠른 깜박임**	설정 오류, 저장 공간 부족, 센서 이상
USB 연결 (데이터 전송)	청색 점등	PC에서 파일 접근 중 — **분리 금지**

충전 · 배터리 상태 LED

USB에 연결한 상태이거나, 버튼을 **LED가 꺼질 때까지 누르고 있으면** 배터리 잔량을 확인할 수 있습니다.

LED 패턴	USB 연결 시 의미	잔량 확인 시
녹색 점등	100 % 충전 완료	75 % 이상
적색 + 녹색 동시	충전 중	20 ~ 75 %
적색만 점등	고온 · 저온으로 충전 불가	20 % 미만
LED 없음	연결 불량 또는 장치 불작동	배터리 방전
청색 점등	PC가 파일에 접근 중	—

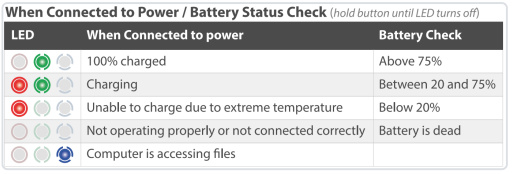

그림 14-1. LED 배터리 상태 표시

> ⚠ **적색 빠른 깜박임이 보이면**
>
> 기록이 정상적으로 진행되지 않는 상태입니다. 현장을 떠나기 전에 반드시 확인하십시오.
> ① 저장 공간 잔량 확인 ② 설정값(샘플레이트 · 트리거) 재확인 ③ USB 연결 후 Lab에서 장치 상태 조회

> **문의 시 함께 보내주실 자료**
>
> ① 모델명과 시리얼 번호 ② 문제가 발생한 IDE 파일 ③ 사용한 설정 파일(Export) ④ 증상 발생 시점의 LED 상태
> **sales@usens.co.kr** 로 보내주시면 설정 · 센서 선정 · 분석 방법까지 함께 검토해 드립니다.

계측하고 바로, 결과를 확인합니다.
측정과 분석이 간단해집니다.

COMPANY	유센스 주식회사 · enDAQ 공식 국내 총판
ADDRESS	서울 송파구 충민로 66, 가든파이브라이프 테크노관 8층
TEL	02-6476-1233 | FAX 02-6971-8999
E-MAIL	sales@usens.co.kr
WEB	www.usens.co.kr