Otter I-V Expert 사용설명서

Semi Otter Edu Co., Ltd. 호스트 앱 `OtterIVExpert_v1_10_3`, 펌웨어 **v0.2.60 이상**에 해당합니다.

> 프로그램 화면은 설치할 때 고른 언어나 Windows 언어, 또는 **설정 → 언어**(Settings → Language)에서 고른 언어에 따라 한국어나 영어로 나옵니다. 이 설명서는 컨트롤 이름을 한국어로 적고 영문을 괄호 안에 함께 적었으므로, 어느 언어의 화면에서도 따라 하실 수 있습니다.

목차

처음 쓰시기 전에 안전 주의사항을 먼저 읽어 주십시오.

1. 이 장비는 무엇인가
2. 첫 측정 전에
3. 예열
4. 현장 영점
5. 연결 패널
6. 샘플링: NPLC, 오프셋 재측정, Smart NPLC, 중앙값 필터
7. 컴플라이언스와 전류 레인지
8. 측정 탭
9. 저장되는 것
10. 캘리브레이션과 재교정 시점
11. 정확도
12. 문제 해결
13. 명령창에서 측정 실행하기
14. 직접 작성한 코드로 장비 제어하기
15. 원격 제어: 자기 노트북의 Claude로 측정하기
16. 업데이트: 프로그램과 장비 펌웨어

안전 주의사항

이 장비는 채널당 최대 ±80 V를 출력합니다. 두 채널을 함께 쓰면 채널 사이에 최대 160 V의 전위차가 생길 수 있습니다.

- **출력이 켜진 상태에서는 단자를 만지지 마십시오.** BNC 단자의 중심 도체, 케이블의 노출된 부분, 소자의 전극이 모두 해당합니다.
- **소자를 연결하거나 분리하기 전에 출력을 끄십시오.** 프로그램의 **실시간 상태**(Live status) 영역에 **출력 꺼짐**(output OFF)이 표시된 것을 확인한 뒤에 작업하십시오.

- **높은 전압으로 측정한 직후에는 잠시 기다리십시오.** 출력을 꺼도 케이블과 소자에 전하가 남아 있을 수 있습니다.
- **접지 전극은 반드시 GND 단자에 연결하십시오.** 접지가 연결되지 않으면 측정값이 부정확해지고, 소자 전체가 높은 전위로 떠오를 수 있습니다.
- **규격에 맞는 USB-PD 충전기를 사용하십시오.** 45 W 이상을 권장합니다. 전력이 부족하면 장비가 동작하지 않습니다.
- **장비를 분해하지 마십시오.** 내부에 고전압 회로가 있습니다. 이상이 있으면 SemiOtter로 문의해 주십시오.

---

1. 이 장비는 무엇인가

전압원 측정 유닛 두 개가 한 보드에 올라가 있습니다. 각 유닛은 전압을 인가하고 그때 흐르는 전류를 측정합니다. 앱과 이 설명서에서는 이 유닛을 **채널**이라고 부르며, 화면에서 채널을 고르는 목록에는 **채널 A**(Ch. A)와 **채널 B**(Ch. B)로, **실시간 상태**(Live status) 패널에는 `Ch. A`와 `Ch. B`로 표시됩니다. 펌웨어와 SCPI 명령에서는 같은 것을 `VSMU1`, `VSMU2`라고 부르는데, 스크립트를 작성하실 때에만 마주치실 이름입니다.

출력 전압	채널당 **±80 V**
전류 측정	약 pA 부터 ±20 mA 까지, 레인지 4단
전류 컴플라이언스	최대 **20 mA**, 극성별로 따로 지정 가능
채널	2개. 함께 쓰면 3단자 소자, 하나만 쓰면 2단자 소자
인터페이스	USB, SCPI 명령 체계

채널이 두 개이므로 3단자 소자를 직접 다룰 수 있습니다. 한쪽 채널이 게이트를 잡고 있는 동안 다른 쪽이 드레인을 스윕하면서 전류를 읽습니다.

이 장비가 아닌 것: 전류원이 아닙니다. 모든 측정은 전압을 인가하는 방식으로 이루어집니다. 실험에서 전류를 직접 명령해야 한다면 이 장비는 맞지 않습니다.

---

2. 첫 측정 전에

설치

`OtterIVExpert_Setup_1.10.3.exe` 를 실행하시면 됩니다. 최신 설치 파일은 언제나 아래 주소에서 받으실 수 있습니다.

```
https://download.semiotteredu.com/otter-iv-expert/OtterIVExpert_Setup.exe
```

설치 시작 화면에서 두 가지 중 하나를 고르시게 됩니다.

선택	설치 위치	관리자 권한
나만 사용	`%LOCALAPPDATA%\Programs\OtterIVExpert`	필요 없음
이 컴퓨터의 모든 사용자	`C:\Program Files\OtterIVExpert`	필요함

개인 노트북이라면 **나만 사용**을 고르시면 됩니다. 관리자 권한을 묻지 않습니다. 여러 사람이 함께 쓰는 실습실 PC라면 **모든 사용자**로 한 번만 설치하는 편이 낫습니다. 계정마다 137 MB씩 중복되지 않기 때문입니다.

설치가 끝나면 시작 메뉴에 **Otter I-V Expert** 가 생기고, 제거는 Windows 의 "앱 및 기능"에서 하시면 됩니다.

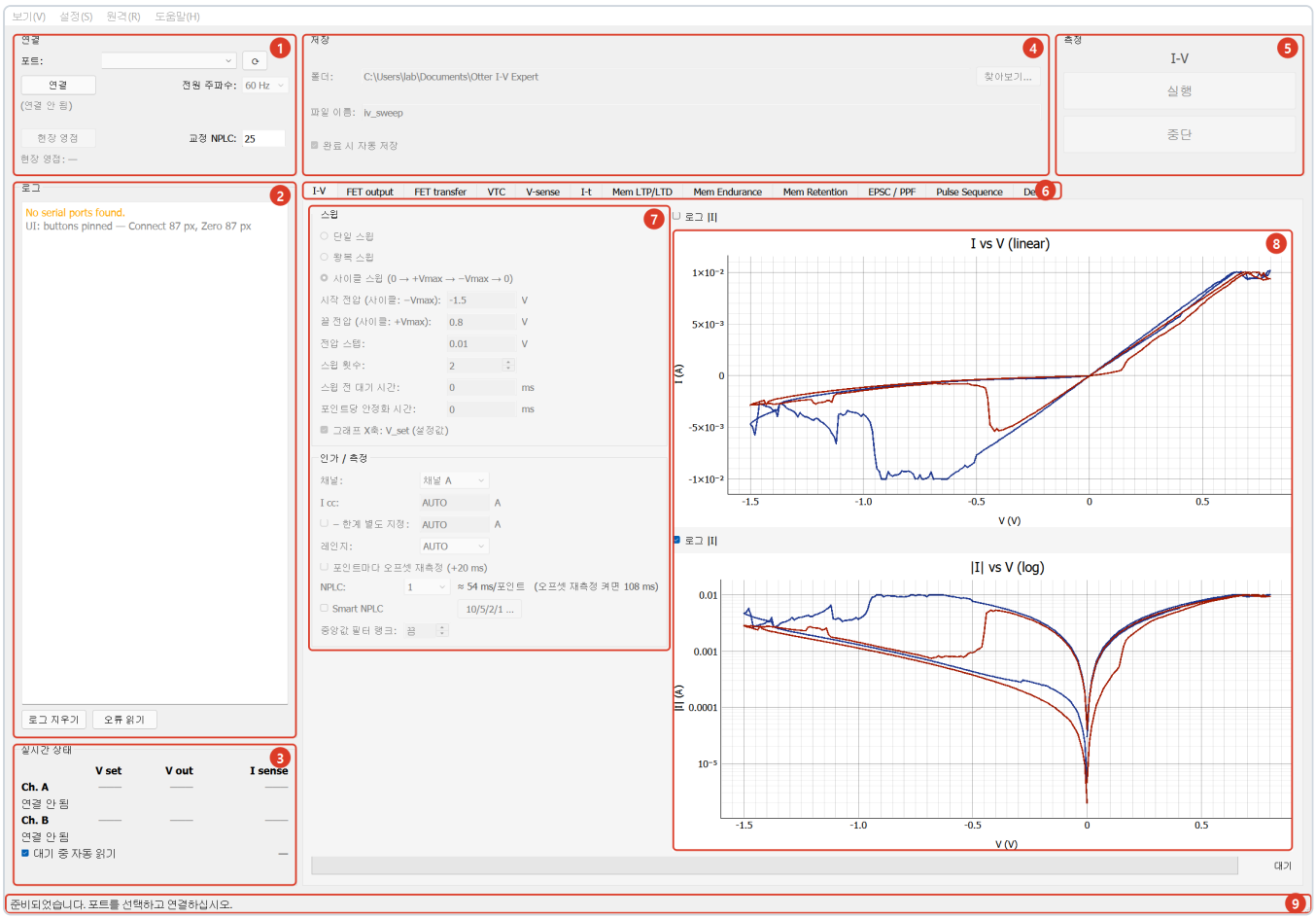
> 설치 프로그램을 쓰지 않고 폴더만 받으셨다면, 원하는 위치에 압축을 풀고 안에 있는 `OtterIVExpert.exe` 를 실행하셔도 똑같이 동작합니다.

첫 실행

처음 실행하실 때 Windows SmartScreen이 *"Windows에서 PC를 보호했습니다"* 를 표시하고, 일부 백신은 알려지지 않은 파일로 분류합니다. 실행 파일에 코드 서명이 없기 때문입니다. **추가 정보 → 실행**을 선택하십시오. 기관 정책으로 실행이 막히면 관리자에게 설치 폴더를 백신 예외 목록에 추가해 달라고 요청하시고, 그래도 안 되면 SemiOtter로 연락 주십시오.

메인 창과 함께 콘솔 창이 하나 더 열립니다. 진단 출력을 보여 주는 창이며, 내용은 전부 로그 파일에도 기록됩니다(§12 참조).

화면 구성



프로그램 화면. I-V 탭에 실제로 측정한 사이클 스윕 두 번이 그려져 있습니다

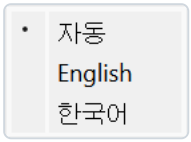
1. **연결**(Connection): 장비의 포트를 고르고 연결합니다. 현장 영점 버튼도 여기에 있습니다(§5).
2. **로그**(Log): 진행 상황, 경고, 오류가 시간 순서대로 표시됩니다. 내용은 화면 언어와 관계없이 영어입니다.
3. **실시간 상태**(Live status): 두 채널의 설정 전압, 출력 전압, 전류를 보여 줍니다.
4. **저장**(Save): 저장 폴더와 파일 이름입니다. 저장 폴더는 모든 탭이 함께 쓰며 다음 실행 때도 기억합니다. 기본값은 문서 폴더 안의 `Otter I-V Expert` 입니다. 쓸 수 없는 폴더이면 시작할 때와 실행을 누를 때 다른 폴더를 고르도록 묻습니다.
5. **측정**(Measurement): 지금 보고 있는 탭의 **실행**(Run)과 **중단**(Abort) 버튼입니다. 누를 수 있는 버튼에만 색이 칠해집니다. 대기 중에는 실행이 연두색이고, 측정 중에는 중단이 빨간색입니다. 회색 버튼은 지금 누를 수 없는 버튼입니다. 측정 중에는 그 아래에 남은 시간이, 끝나면 걸린 시간이 표시됩니다. 남은 시간은 지금까지의 실제 진행 속도로 계산합니다.
6. 측정 탭입니다. 탭마다 하는 일은 §8에 있습니다.
7. 측정 설정입니다. 탭마다 항목이 다릅니다.
8. 그래프입니다. 위는 선형 축, 아래는 로그 축입니다.
9. 상태 표시줄입니다. 안내 문구가 나오고, 새 버전이 있으면 업데이트 단추가 생깁니다(§16).

화면 언어

프로그램 화면은 한국어나 영어로 나옵니다. 설치 프로그램의 첫 화면에서 언어(한국어 / English)를 묻고, 프로그램은 그 선택을 따릅니다. 나중에 바꾸시려면 **설정 → 언어**(Settings → Language)에서 다음 중 하나를 고르십시오.

선택	화면 언어
자동(Automatic)	설치할 때 고른 언어를 따르고, 없으면 Windows 언어를 따릅니다. 기본값입니다
English	영어
한국어	한국어

우선순위는 **설정 → 언어**의 선택, 설치할 때 고른 언어, Windows 언어 순입니다. 선택은 프로그램을 다음에 시작할 때부터 적용됩니다. 데이터 파일(CSV, `.md`), 로그, 명령창 실행은 화면 언어와 관계없이 항상 영어입니다. 그래서 어느 PC에서 측정하든 파일 형식과 스크립트가 같습니다.



설정 → 언어 메뉴

화면 테마

설정 → 테마(Settings → Theme)에서 **밝은 모드**(Light)와 **다크 모드**(Dark) 중 하나를 고르십시오. 기본값은 밝은 모드입니다. 다크 모드에서는 창과 그래프의 배경이 어두워지고, 곡선과 글자는 어두운 배경에서 잘 보이는 밝은 색으로 바뀝니다. 창의 제목 표시줄도 어두워집니다. 테마는 Windows 의 다크 모드 설정과 관계없이 이 메뉴의 선택을 따릅니다. 언어와 마찬가지로 선택은 프로그램을 다음에 시작할 때부터 적용됩니다. 데이터 파일(CSV, `.md`)은 테마와 관계없이 같습니다. 측정마다 함께 저장되는 화면 캡처(JPG)는 보이는 화면 그대로 저장되므로, 다크 모드에서는 어두운 화면으로 남습니다.

연결

1. 장비에 전원을 넣은 다음 USB를 연결합니다.
2. 앱을 실행하고 **연결**(Connection) 패널의 **포트**(Port)에서 COM 포트를 선택한 뒤 **연결**(Connect)을 누릅니다.
3. 로그에 식별 문자열이 출력됩니다.

```
*IDN? → SemiOtter,Otter-IV-Expert,R01-26-101,v0.2.60,FieldZero=None
```

다섯 개 필드를 한 번은 확인해 주십시오. 세 번째가 장비의 시리얼 번호이고, 네 번째가 펌웨어 버전입니다. 다섯 번째는 현장 영점의 상태입니다. 전원을 켠 뒤에는 `FieldZero=None`이고, 현장 영점을 잡으면 잡은 시각이 `FieldZero=2026-10-18T22:14:05`처럼 들어갑니다(§4).

선택한 포트가 Otter I-V Expert가 아니면(다른 장치가 응답하거나 응답이 없으면) 앱은 연결하지 않고 로그에 그 사실을 적습니다.

시리얼이 `SN0000`이거나 공장 교정 날짜가 없는 장비는 연결은 되지만 로그에 주황색 경고가 나옵니다. 공장 캘리브레이션을 거치지 않은 장비이니 SemiOtter로 연락 주십시오.

앱이 펌웨어가 **출하 빌드보다 뒤처져 있다**고 경고하면 §16에 따라 업데이트하십시오. 측정은 그 전에도 됩니다.

상용 전원 주파수

앱은 연결 시점에 장비가 어떤 주파수로 설정되어 있는지 물어보고 출력합니다.

```
Mains: 60 Hz — 1 NPLC = 400 samples = 16.67 ms (paced)
```

이 값이 실제 벽면 전원과 일치해야 합니다. 적분 시간을 **상용 전원의 주기 단위**로 세는 이유가 바로 평균화의 널(null)을 전원 주파수에 정확히 맞추기 위해서이기 때문입니다. 값이 틀리면 50/60 Hz 유도 잡음이 제거되지 않고, 저전류 측정에서 주기적인 흔들림으로 나타납니다.

---

3. 예열

예열은 필요 없습니다. 연결한 뒤 바로 현장 영점(Field zero)을 한 번 잡으십시오(§4).

---

4. 현장 영점

공장 교정과 구분하기 위해 현장 영점이라고 부릅니다. 연결한 뒤 한 번 잡으면 됩니다. 장비 자체의 영점은 0.1 nA 이하로만 움직이므로, 그 뒤에는 픽스처가 바뀌었을 때 다시 잡습니다.

현장 영점 버튼이 존재하는 이유

전류 측정은 기준값으로부터의 차이입니다. 그리고 그 기준값은 장비만의 성질이 아닙니다. **여러분의 픽스처**가 함께 포함됩니다. 프로브 카드, 배선, 소자가 놓인 소켓의 누설 전류가 모두 여기에 들어갑니다. 프로브를 들어 올린 상태에서 잡은 영점은 정작 측정할 때에는 존재하지 않는 회로를 기술한 값입니다.

현장 영점을 잡는 방법

1. 픽스처를 측정할 때와 **똑같은 상태**로 만듭니다. 프로브를 내리고, 배선을 정리하고, 덮개를 닫습니다.
2. **0 V에서 도통하는 것이 없어야 합니다.** 소자를 빼시거나 부품이 없는 소켓을 쓰십시오.
3. **현장 영점**(Field zero)을 누릅니다.

부팅 직후라면 먼저 전체 오프셋 캡처가 수행됩니다. 이 과정은 시간이 걸리고 중단할 수 없습니다. 그다음에는 영점이 안정되는 과정을 지켜보다가(`현장 영점: 안정화 중…`) 멈추면 안정된 영점을 저장합니다(`현장 영점: 안정된 영점 저장 중…`, 약 30초). 안정화 단계는 같은 버튼으로 건너뛸 수 있으며, 진행 중에는 버튼 문구가 **건너뛰기**(Skip)로 바뀝니다.

✅ `현장 영점 완료 — 측정 가능`이 표시될 때까지는 **실행**(Run), **연결 해제**(Disconnect), 창 닫기가 잠깁니다. 서두르실 때는 **건너뛰기**(Skip)를 누르신 뒤 끝날 때까지 기다려 주십시오.

현장 영점 버튼은 공장 게인 캘리브레이션을 **건드리지 않습니다.**

다시 잡아야 할 때

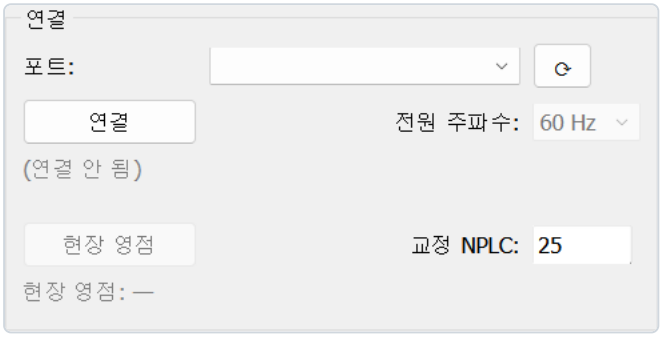
- 프로브, 배선, 소켓을 바꾸거나 옮긴 뒤. 영점에는 픽스처가 포함되기 때문입니다.
- 장비 전원을 껐다 켠 뒤, 펌웨어를 업데이트한 뒤. 영점은 장비 메모리에만 있습니다.

장비 자체의 영점 변화는 0.1 nA 이하이므로, 그 밖에는 필요할 때만 다시 잡으면 됩니다. 공장에서 저장한 영점은 없습니다.

---

5. 연결 패널

연결(Connection) 패널의 컨트롤입니다.



연결 패널

컨트롤	역할
포트(Port) / **연결**(Connect)	시리얼 포트 선택. 새로고침 버튼이 포트를 다시 검색합니다.
현장 영점(Field zero)	현장 영점을 확립합니다. §4 참조.
교정 NPLC(Cal NPLC)	오프셋 캡처 단계에만 적용되는 점당 평균 횟수입니다. 기본값 **25**. 높이면 영점이 정밀해지는 대신 캡처가 길어집니다. 1로 두면 약 5배 잡음이 큰 영점이 저장됩니다.
실시간 상태(Live status)	대기 중일 때 두 채널을 폴링하여 값이 안정되는 과정을 볼 수 있게 합니다. 측정 중에는 동작하지 않습니다.
MCU 온도(MCU Temp)	다이 온도와, 기준 시점 대비 변화량입니다. 기준은 처음에는 연결 시점(`연결 이후`, since connect)이고, 현장 영점을 한 번 잡으시면 그 시점(`마지막 현장 영점 이후`, since last Field zero)으로 옮겨 갑니다. 참고용 수치입니다.

거부된 설정과 그 이유는 화면 아래쪽 **로그**(Log) 창에 나옵니다.

---

6. 샘플링: NPLC, 오프셋 재측정, Smart NPLC, 중앙값 필터

한 포인트에 걸리는 시간과 잡음을 정하는 컨트롤은 **연결**(Connection) 패널이 아니라 **각 측정 탭에** 있습니다. 측정에 속하는 설정이고 저장되는 메타데이터에 함께 기록되기 때문입니다. **Smart NPLC**와 **중앙값 필터 랭크**는 I-

V, FET output, FET transfer 탭에만 있습니다.

```
[ ] 포인트마다 오프셋 재측정 (+20 ms)
NPLC:  [ 1 ▾ ]   ≈ 54 ms/포인트   (오프셋 재측정 켜면 108 ms)
[ ] Smart NPLC              [ 10/5/2/1 … ]
중앙값 필터 랭크:  [ 끔 ]
```

포인트마다 오프셋 재측정, 기본값 꺼짐

켜면 읽기 하나하나 옆에서 장비가 자신의 접지 기준을 함께 측정하여 빼냅니다. 저장 파일에는 `ADC autozero`로 기록됩니다. 현재 하드웨어는 이 보정이 잡아낼 드리프트가 거의 없으므로 기본값은 꺼짐입니다.

점당 시간은 다음과 같습니다(오프셋 재측정 끔).

레인지	NPLC 1	NPLC 0.025
고정	약 36 ms	약 1.6 ms
AUTO	약 54 ms	약 2.1 ms

오프셋 재측정을 켜면 NPLC 1에서 약 두 배(AUTO 레인지 108 ms), NPLC 0.025에서는 약 20 ms가 더 걸립니다. 이 20 ms는 멀티플렉서 정착 시간이므로 NPLC를 낮춰도 줄지 않습니다. 포인트당 시간 표시는 탭의 레인지 설정을 따라 바뀝니다.

현장 영점(Field zero) 버튼은 이 스위치와 무관하게 항상 켠 상태로 동작합니다.

Smart NPLC

전류가 작을수록 길게 적분합니다. 각 포인트의 첫 판독으로 전류 구간을 정하고, 그 구간에 정한 NPLC만큼 NPLC 1 판독을 반복해 평균한 값을 그 포인트의 값으로 씁니다. 기본값은 다음과 같고, 옆의 단추(`10/5/2/1 …`)로 바꿀 수 있습니다. 바꾼 값은 모든 탭에 함께 적용되고 이 PC에 저장됩니다.

전류 구간	기본 NPLC
sub-nA (1 nA 미만)	10
nA (1 nA – 1 µA)	5
µA (1 µA – 1 mA)	2
mA (1 mA 이상)	1

NPLC 1 판독을 반복해 평균하므로 전원 노이즈 제거와 잡음 평균 효과는 그 NPLC로 한 번 읽는 것과 같습니다. 켜면 NPLC 선택은 쓰지 않으며, 점당 시간은 범위로 표시됩니다.

정한 횟수만큼 읽은 뒤에는 그 **평균**과 **마지막 판독**으로 구간을 다시 확인합니다. 전압을 바꾼 직후에는 소자의 충전 전류(예: FET 게이트의 정전 용량) 때문에 첫 판독이 크게 나올 수 있는데, 둘 중 하나라도 더 많은 판독을 요구하는 구간에 들면 모자란 만큼 더 읽고 전부를 평균합니다. 판독 수는 표에서 가장 큰 NPLC(기본 10)를 넘지 않습니다.

FET 탭에서는 Smart NPLC 옆에서 적용할 채널을 **드레인**(Drain), **게이트**(Gate), **드레인 + 게이트**(Drain + gate) 중에서 고릅니다. 기본값은 드레인이고, 적용하지 않는 채널은 NPLC 1로 읽습니다. 게이트 누설 전류는 거의 항상 sub-nA 구간이어서, 게이트에도 적용하면 포인트마다 게이트를 10번 읽게 됩니다(NPLC 1 판독 한 번이 약 54 ms이므로 포인트마다 약 0.5초 추가). 누설 전류 자체를 보셔야 할 때에만 게이트를 포함해 주십시오. 어느 채널에 적용했는지는 저장 파일에 함께 기록됩니다.

포인트마다 실제로 쓴 NPLC는 CSV의 마지막 열(I-V는 `NPLC_eff`, FET는 `NPLC_eff_D`, `NPLC_eff_G`)에 저장되고, 측정 중에는 **실시간 상태**(Live status)에 `· NPLC 10`처럼 표시됩니다. FET 탭의 점당 시간 표시는 드레인과 게이트 판독을 합친 시간입니다.

중앙값 필터

랭크 R이면 포인트마다 2R+1번 읽고 V와 I 각각의 중앙값을 그 포인트의 값으로 씁니다. 한 번만 튀는 값은 버려지고, 소자가 스위칭하는 것처럼 실제로 바뀐 값은 모든 판독에 나타나므로 그대로 남습니다. 0은 꺼짐이고 최대 5입니다. 점당 시간은 2R+1배가 되며, 표시되는 시간에 이미 반영되어 있습니다. Smart NPLC와 함께 쓰면 2R+1번의 판독 하나하나가 Smart NPLC 평균입니다.

이 절의 설정과 탭의 나머지 입력(스윕 범위와 간격, 횟수, 대기 시간, 컴플라이언스, 레인지, 채널 선택, 파일 이름 등)은 탭마다 이 PC에 저장되어, 프로그램을 다시 시작해도 마지막 값으로 돌아옵니다. 원격 제어로 실행한 측정의 값은 그 측정에만 쓰입니다. 펄스 시퀀스 탭에서 불러온 시퀀스 파일은 다시 불러오셔야 합니다.

NPLC

1 NPLC는 상용 전원의 한 주기입니다. 60 Hz에서 16.67 ms, 50 Hz에서 20 ms입니다. 길수록 조용해지고 느려집니다.

선택지는 0.025 부터 시작하고, 1 이상은 정수만 있습니다.

- 0.025 미만은 적분 시간이 더 줄지 않으므로 없습니다(펌웨어가 샘플 수를 10으로 제한합니다).
- 1 이상의 소수점 NPLC 는 전원 주파수를 상쇄하지 못하므로 없습니다(x.5가 가장 나쁩니다).

비용 라벨은 항상 **지금 적용 중인 설정을 앞에** 두고 반대쪽을 괄호에 넣습니다. 상용 전원 설정을 따라가므로 50 Hz와 60 Hz를 오갈 때 20% 달라집니다.

---

7. 컴플라이언스와 전류 레인지

컴플라이언스

전류 제한값입니다. 소프트웨어 검사가 아니라 **하드웨어 루프**입니다.

기본적으로 하나의 값이 양쪽 극성에 함께 적용됩니다. **– 한계 별도 지정**(Separate − limit)을 체크하면 음의 제한값을 따로 지정할 수 있습니다. 멤리스터의 forming 단계처럼 한쪽 방향으로는 자유롭게 도통시키고 반대 방향으로는 보호해야 하는 소자에서 필요합니다.

컴플라이언스 AUTO

컴플라이언스 칸에는 숫자 대신 `AUTO`를 적을 수 있습니다. `AUTO`는 고른 레인지에 맞춰 값이 정해지며, 레인지를 끝까지 읽을 수 있도록 레인지보다 조금 크게 잡습니다.

레인지	AUTO 컴플라이언스
AUTO, 20 mA	20 mA
1 mA	1.2 mA
20 µA, 1 µA	50 µA

- **기본값:** I-V, I-t, FET 탭은 `AUTO`가 기본입니다. 멤리스터·펄스·시냅스 탭은 숫자가 기본입니다. 이 탭들에서는 컴플라이언스가 소자를 보호하는 값이 아니라 SET 상태를 정하는 실험 조건이기 때문입니다. `AUTO`로 두면 읽기 해상도를 위해 레인지만 바꿔도 SET 조건이 함께 바뀝니다. 원하시면 이 탭들에서도 `AUTO`를 적을 수 있습니다.
- **기록:** 메타데이터와 로그에는 실제로 적용된 숫자가 적힙니다.
- **이전 버전에서 업데이트한 경우:** 탭에 저장된 입력값이 그대로 돌아오므로, `AUTO`를 쓰려면 칸에 직접 적어 주십시오.
- **고전압:** 노드 전압이 높을 때의 정확도는 아래 「고전압에서의 컴플라이언스」를 보십시오.
- **20 µA 미만:** 실제로 걸리는 전류가 설정값에서 크게 벗어납니다(100 kΩ 부하에서 10 µA 설정에 최대 118 %, 5 µA 에 최대 145 %, 1 µA 에 30~119 %. 20 µA 는 105~106 %). 앱이 경고합니다. 소자를 보호하는 값이면 20 µA 이상으로 두십시오.

고전압에서의 컴플라이언스

컴플라이언스 제한값은 출력 노드 전압이 약 3 V 를 넘으면 노드 전압에 비례해 어긋납니다. 펌웨어가 노드 전압을 읽어 이 오차를 보정합니다(측정할 때마다, 대기 중에는 0.1초마다).

전류 방향	보정 전 오차 (3 V 를 넘는 1 V 당)	보정 후 (교정 계수가 있는 장비)
부하로 내보낼 때	0.25~0.53 µA 만큼 **낮게** 걸림	노드 10~67 V 에서 설정값의 −4~+7 %
외부 장비가 밀어 넣을 때	0.52~0.63 µA 만큼 **높게** 걸림	10 µA 제한에 40 V 를 1 MΩ 으로 밀어 넣을 때 약 13 µA

- 1 mA 이상의 컴플라이언스에서는 이 오차가 0.5 % 이하입니다.
- 교정 계수는 공장 교정 때 채널마다 측정해 장비에 저장합니다. 계수가 없는 장비는 기본값으로 보정하므로 오차의 일부만 줄어듭니다.
- 앱은 이 오차 범위 안에서 낮게 걸린 점을 컴플라이언스로 분류하고, 설정보다 낮게 걸렸다는 사실을 로그에 적습니다.

컴플라이언스에 걸렸을 때 장비가 하는 일

하드웨어 루프가 전류를 붙잡는 동안 펌웨어는 인가 전압을 노드 전압의 2 % 안쪽까지 내려 루프의 흔들림을 멈추고, 전류가 제한값의 85 % 아래로 내려가면 명령 전압 쪽으로 되돌립니다. 전류 제한 자체는 하드웨어가 지킵니다.

- 컴플라이언스에 걸린 점의 전류는 제한값의 **약 90~98 %** 로 읽힙니다(노드 전압 0.5 V 이상에서 98 %, 0.1 V 근처에서 90 %).
- 어느 점이 제한에 걸렸는지는 메타데이터와 `:STAT:COMP<N>?` 로 알 수 있습니다. `2` 는 소프트웨어 루프가 전압을 낮추어 잡고 있다는 뜻이고, `:SOUR<N>:VOLT:CEIL?` 이 그 전압입니다.

태양전지처럼 스스로 전류를 내는 시료를 스윕하다 제한에 걸려도, 명령 전압이 제한 지점을 지나면 그대로 인가되므로 갇히지 않습니다. 하드웨어 클램프 자체를 보려면 `:SOUR<N>:CURR:MODE HW` 를 보내십시오. 전원을 켜면 다시 `SOFT` 입니다.

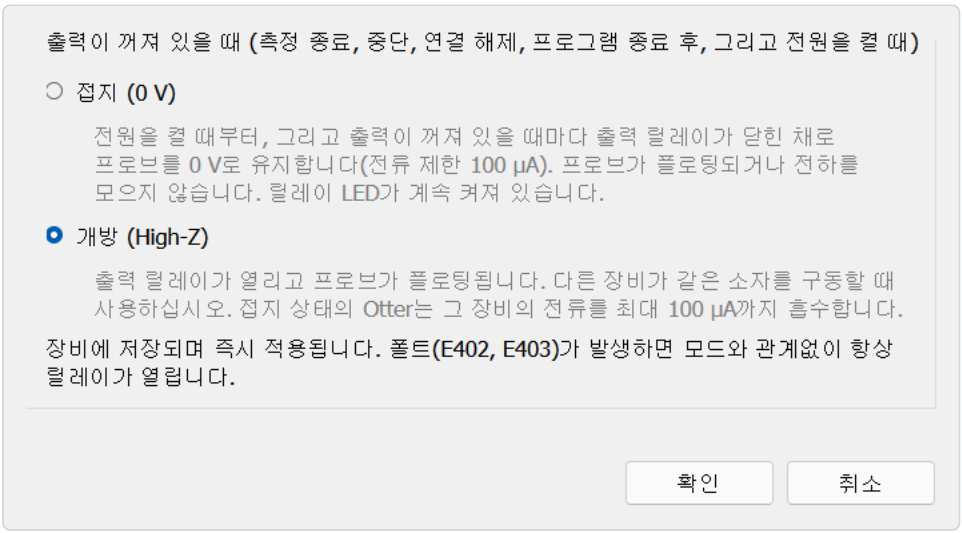
다른 SMU 와 함께 쓸 때

Otter 가 전압을 잡고 있는 노드에 다른 장비가 전압을 걸면 Otter 는 자기 컴플라이언스까지 그 전류를 **흡수**합니다. 이때 출력 증폭기에 걸리는 전력은 (노드 전압 + 80 V) × 전류로, 20 mA 컴플라이언스에서 40 V 노드라면 2.4 W 에 이르러 증폭기가 손상될 수 있습니다.

1. 두 장비의 LO 를 묶고, **같은 노드에 두 장비가 전압을 걸지 않도록** 회로를 구성하십시오. 한쪽은 전압, 다른 쪽은 전류 측정이 원칙입니다.
2. 부득이하게 한 노드를 함께 잡아야 하면 Otter 의 컴플라이언스를 **1 mA 이하**로 두십시오.
3. 로그에 `E701` (전력이 흘러 들어옴) 이 보이면 위 상황이 벌어진 것입니다. 측정은 멈추지 않으니 회로를 점검하십시오.
4. 아래의 출력 OFF 상태를 **개방 (High-Z)**(Open (High-Z)) 으로 두십시오. **접지 (0 V)**(Grounded (0 V)) 인 Otter 는 출력이 꺼져 있어도 단자에 걸린 전류를 최대 100 µA 까지 받아들이므로, 다른 장비의 측정값이 틀어집니다.

출력이 꺼져 있을 때: 접지와 개방

메뉴 **설정 → 장비 설정...**(Settings → Instrument settings...) 에서 출력이 꺼져 있는 동안 프로브를 어떻게 둘지 고릅니다. 측정이 끝날 때, **중단**(Abort), **연결 해제**(Disconnect), 프로그램을 닫을 때, 장비를 켤 때 모두 이 설정을 따릅니다.



장비 설정 창

설정	출력이 꺼져 있는 동안
접지 (0 V)(Grounded (0 V))	출력 릴레이를 닫은 채 프로브를 0 V 에 묶어 둡니다(전류 제한 100 µA). 출력을 끌 때는 먼저 0 V 로 내려 100 ms 동안 방전합니다. 출력 릴레이 LED 는 계속 켜져 있습니다
개방 (High-Z)(Open (High-Z))	출력 릴레이를 열어 프로브가 떠 있습니다. 기본값입니다

개방에서도 릴레이가 열리는 순간에는 프로브가 거의 0 V 까지 방전됩니다. 그러나 떠 있는 프로브는 케이블과 지그 절연체의 유전 흡수 때문에 몇 초 안에 직전 전압의 수 % 까지 다시 올라옵니다(40 V 를 낸 뒤 10 초에 +1.5 V). 작은 전압에도 상태가 바뀌는 시료(얇은 산화막, 멤리스터)라면 **접지 (0 V)** 를 권합니다.

설정은 장비 안에 저장되므로 다른 PC 에 연결해도 그대로입니다. 장비가 연결되어 있고 출력이 모두 꺼져 있을 때만 바꿀 수 있습니다. 고장으로 출력이 꺼지면(`E402` , `E403`) 설정과 관계없이 릴레이가 열립니다.

레인지

설정	풀스케일
AUTO	레인지를 자동으로 고르고 전류가 움직이면 바꿉니다
20 mA	±20 mA
1 mA	±1 mA
20 µA	±20 µA
1 µA	±1 µA

레인지 이름은 그 레인지가 읽을 수 있는 상한입니다(이전 버전의 10 µA·10 mA 레인지와 같은 레인지이며, 명령어에 쓰는 값 `1E-5` , `1E-2` 도 같습니다).

고정한 레인지는 자동으로 바뀌지 않습니다. 고정된 레인지에서 전류가 범위를 넘으면 출력은 그대로 두고 측정을 계속합니다. 범위를 넘은 점의 전류는 레인지 끝에서 잘린 값으로 저장되며(실제 전류는 그보다 큽니다), CSV 의 `note` 열에 `over range` 라고 적힙니다. 실시간 상태창에는 빨간색으로 `≥` / `≤` 를 붙여 표시되고, 측정이 끝나면 로그와 메타데이터(`Over-range readings`)에 몇 번 넘었는지 적습니다. 전압 값은 정상입니다. 그래프에서는 그 점들이 레인지 끝에서 평평하게 보이므로 소자의 포화로 오해하지 마십시오.

1 µA·20 µA 레인지의 컴플라이언스: 이 두 레인지에서 하드웨어는 컴플라이언스를 약 125 µA까지만 지킵니다. 그래서 앱은 이 두 레인지를 고정하면 컴플라이언스를 **최대 100 µA**로 낮춰 적용하고, 그 사실을 로그와 메타데이터(`Compliance applied`)에 적습니다. 100 µA 이하로 설정한 값은 그대로 적용됩니다. 100 µA보다 큰 컴플라이언스가 필요하면 1 mA 레인지나 AUTO를 쓰십시오. 컴플라이언스는 설정값의 조금 앞에서부터 전류를 누르므로(20 µA 설정이면 약 17.5 µA까지 직선), 20 µA 가까이 재려면 25 µA 정도로 두십시오.

`E402` : 1 µA·20 µA 레인지에서 전류 증폭기가 포화되고 컴플라이언스가 100 µA보다 크게 설정되어 있으면 장비가 출력을 끕니다. 앱으로 측정할 때는 위의 상한 때문에 생기지 않습니다.

실제로 읽을 수 있는 상한은 장비마다 조금 다릅니다. 20 mA 레인지는 약 19.7~20 mA, 1 µA·1 mA 레인지는 약 1.01 µA·1.01 mA까지 읽습니다. 100 µA 레인지는 없습니다.

AUTO는 1 µA → 20 µA → 1 mA → 20 mA 순서로 옮겨 갑니다. 20 µA 레인지에서 1 mA 레인지로는 약 17 µA에서 넘어가고, 돌아올 때에는 약 13 µA 아래에서 돌아옵니다. 13~17 µA 사이에서 시작하는 스윕은 전류가 13

μA 아래로 내려갈 때까지 1 mA 레인지로 읽습니다.

AUTO의 첫 판독: AUTO는 출력을 켤 때마다 1 mA 레인지에서 시작하고, 작은 전류가 세 번 연속으로 읽힌 뒤에 1 μA·20 μA 레인지로 내려갑니다. 그래서 출력을 켠 직후의 판독 두 번에는 1 mA 레인지의 오차(수 nA)가 실립니다. 앱은 출력을 켠 뒤 AUTO 채널의 판독을 **처음 5회 버리고** 측정을 시작하므로 기록되는 첫 점에는 이 오차가 없습니다. 측정 시작이 채널당 NPLC 1에서 약 0.4초, NPLC 10에서 약 3초, NPLC 25에서 약 7초 늦어집니다. 횟수는 **설정 → AUTO 레인지 첫 판독 버리기**(Settings → AUTO range: discard first reads)에서 꺼짐 / 3회 / 5회(기본값) / 10회 중에 고릅니다. 이 PC에 저장되고 다음 측정부터 적용되며, 메타데이터의 `Range` 에 `AUTO (first 5 reads discarded)` 처럼 적힙니다. 꺼짐을 고르면 이전처럼 1회만 버리므로 첫 점이 수 nA 튈 수 있습니다. 고정한 레인지는 처음부터 그 레인지로 읽으므로 이 설정과 관계없이 1회만 버립니다. 명령창 실행은 이 PC의 설정을 읽지 않고 기본값 5회를 쓰며, `--auto-discard <N>` 인자로 바꿀 수 있습니다.

---

8. 측정 탭

모든 탭이 같은 골격을 공유합니다. 위쪽에 파라미터, **실행**(Run) / **중단**(Abort) 한 쌍, 실시간 플롯, 그리고 **저장**(Save) 박스입니다. 측정이 진행되는 동안에는 파라미터가 잠깁니다. 아래에는 각 탭에만 해당하는 사항만 적었습니다.

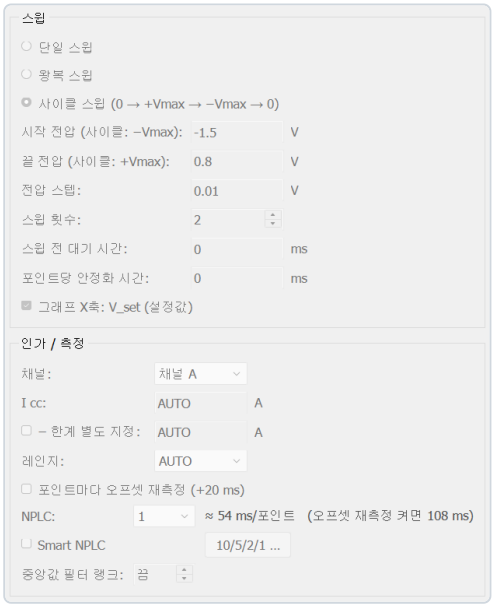
쓰지 않는 탭은 메뉴 **보기**(View) 에서 체크를 풀어 숨길 수 있습니다. 숨긴 탭은 설정과 함께 그대로 남아 있다가 다시 체크하면 돌아오고, **모든 탭 표시**(Show all tabs) 로 한꺼번에 되돌릴 수 있습니다. 선택은 이 PC 에 저장됩니다. 측정 중에는 이 메뉴가 잠깁니다.

VTC와 **V-sense** 탭은 처음에 숨겨져 있습니다. 쓰시려면 **보기**(View) 메뉴에서 체크해 주십시오.

I-V

한 채널에서 수행하는 전압 스윕입니다. 저항, 다이오드, 멤리스터 같은 2단자 소자를 대상으로 합니다.

- **스윕**(Sweep): **단일 스윕**(Single sweep, start → stop), **왕복 스윕**(Double sweep, start → stop → start), **사이클 스윕**(Cycle sweep, 0 → +Vmax → −Vmax → 0) 중에서 고릅니다. 사이클 모드에서는 **시작 전압**(V start)과 **끝 전압**(V stop) 필드가 ∓Vmax로 해석됩니다.
- **전압 스텝**(V step): 전압 간격입니다. 측정점 개수는 여기에서 따라 나옵니다.
- **스윕 전 대기 시간**(Wait before sweep): 출력이 켜진 뒤 첫 점을 찍기 전까지의 정착 대기 시간입니다.



I-V 탭의 측정 설정

FET output

게이트 전압마다 하나씩, Vds에 대한 Ids 곡선을 그립니다. 두 채널을 사용합니다.

- **게이트 전압 지정**: 두 가지 방식 중에서 고르실 수 있습니다.
- **목록**(List): 쉼표로 구분해 직접 나열합니다. 항목 하나가 곡선 하나입니다. 의도적으로 고른 몇 개의 바이어스를 쓰실 때 적합합니다.
- **시작 / 종료 / 스텝**(Start / stop / step): 등간격 격자를 쓰실 때 적합합니다. 시작값과 끝값이 모두 포함되며, 간격이 구간을 정확히 나누지 않더라도 끝값은 반드시 마지막 점으로 들어갑니다. 스윕 탭과 같은 규칙입니다.

선택하지 않은 쪽 입력란은 회색으로 비활성화됩니다. 어느 쪽이 켜져 있든 그 아래에 **실제로 만들어질 값과 개수가 미리 표시**되므로, 실행(Run)을 누르기 전에 확인하실 수 있습니다. 값이 잘못되었으면 그 자리에 이유가 나옵니다. - **Vgs 스텝당 대기 시간**(Wait per Vgs step): 게이트가 움직인 뒤 드레인 스윕이 시작되기까지의 정착 시간입니다.

값 하나가 드레인 스윕 하나이므로 개수는 **최대 201개**입니다. 넘으면 몇 개가 되는지와 함께 알려 드립니다.

FET output 탭의 측정 설정

FET transfer

드레인 바이어스마다 하나씩, Vgs에 대한 Ids 곡선을 그립니다. 위 탭과 대칭 구조입니다.

- **드레인 바이어스 지정**: FET output의 게이트 전압과 똑같이 **목록**(List)과 **시작 / 종료 / 스텝**(Start / stop / step) 중에서 고르실 수 있고, 미리 보기와 201개 제한도 동일하게 적용됩니다. 선형 영역과 포화 영역 두 점만 보실 때에는 목록이, Vds를 등간격으로 훑으실 때에는 시작 / 종료 / 스텝이 편합니다.

FET transfer 탭의 측정 설정

VTC

인버터의 전압 전달 특성(VTC)을 그립니다. 입력 채널이 V_in 을 스윕하고, 다른 채널이 각 점에서 출력 전압 V_out 을 **전류를 흘리지 않고** 잽니다.

VTC 탭의 측정 설정

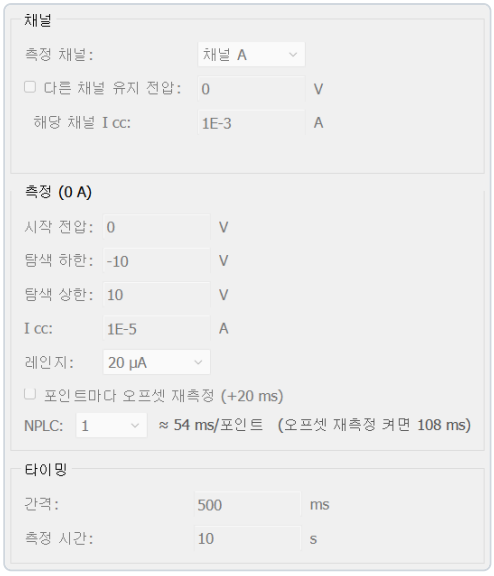
- **연결**: 입력 채널은 인버터 입력에, 출력 감지 채널은 인버터 출력에 연결합니다. **VDD 는 외부 전원으로 공급해 주십시오.** VTC 에는 단자가 세 개(VDD, 입력, 출력) 필요한데 장비의 채널은 두 개이기 때문입니다.
- **왜 0 A 로 재는가**: 인버터 출력은 출력 저항이 수십~수백 kΩ 이어서, 보통의 전압계처럼 전류를 조금만 끌어가도 곡선의 모양과 스위칭 전압이 달라집니다. 출력 감지 채널은 매 점마다 자기 전압을 옮겨 가며 **전류가 0 A 가 되는 전압**을 찾고, 그 전압을 V_out 으로 기록합니다. 전류가 흐르지 않으므로 인버터에는 아무것도 연결되지 않은 것과 같습니다.
- **탐색 하한 (GND) / 탐색 상한 (VDD)**(Search low / high): 출력 감지 채널이 전압을 찾는 범위입니다. **인버터의 전원 범위 (GND 와 VDD)를 넣어 주십시오.** 채널은 이 범위보다 0.1 V 까지만 더 나가서 찾습니다. 출력이 VDD 나 GND 에 붙어 있는 점은 0 A 가 되는 전압이 전원보다 몇 mV 바깥에 있기 때문입니다. 0.1 V 는 접합이 켜지는 전압보다 훨씬 낮으므로, 출력단을 순방향으로 바이어스하는 일은 생기지 않습니다.
- **측정 I cc**(Sense I cc): 전압을 찾는 동안 흐를 수 있는 전류의 상한입니다. 기본값 10 µA 와 레인지 20 µA 고정이 검증된 조합입니다. 탐색이 끝나면 전류는 사실상 0 이 됩니다.
- **결과**: 왼쪽 플롯은 V_out 대 V_in 이고 점선은 V_out = V_in 입니다. 오른쪽은 이득(dV_out/dV_in)입니다. 측정이 끝나면 스위칭 전압 V_M(곡선이 점선과 만나는 점)과 최대 이득을 로그와 플롯 아래에 표시합니다.
- **속도와 정확도**: NPLC 1 에서 한 점에 약 0.1~0.3 초 걸립니다. 출력 저항 1 kΩ~1 MΩ 인 노드에서 실제 전압과의 차이는 약 −2~−4 mV 이고, 10 MΩ 에서는 약 ±10 mV 입니다.
- 어떤 점에서 **OPEN** 이 기록되면 그 점에서는 전류가 어느 전압에서도 흐르지 않은 것입니다. 출력 감지 채널이 연결되어 있는지 확인해 주십시오. 탐색이 끝나지 않은 점(**MAXIT**)은 값을 비워 둡니다.
- **VDD 전원의 전류 레인지를 고정해 주십시오**(예: 1 mA 레인지). 전류 레인지가 AUTO 인 전원은 레인지 경계에서 전류를 제한하므로, 출력이 VDD 로 끌려 올라가지 못해 곡선에 엉뚱한 점이 생깁니다.

V-sense

한 채널을 **전류를 끌어가지 않는 전압계**로 써서, 정해진 간격으로 노드의 전압을 기록합니다. 출력 저항이 큰 노드(소자의 출력, 셀의 개방 전압 등)를 부하 없이 잴 때 씁니다. 원리는 VTC 와 같습니다. 채널이 전류가 0 A 가 되는 전압을 찾고, 그 값을 기록합니다.

- **시작 전압 / 탐색 하한 / 탐색 상한**(Start at / Search low / Search high): 첫 탐색의 시작 전압과 탐색 범위입니다. 두 번째 측정부터는 직전 값에서 시작하므로 빨리 끝납니다. 범위는 그 노드가 안전하게 견딜 수 있는 전압 안으로 잡아 주십시오.
- **다른 채널 유지 전압**(Hold the other channel at): 켜면 다른 채널이 그동안 일정 전압을 유지합니다. 소자의 전원이나 게이트를 걸어 둘 때 씁니다.

- **간격 / 측정 시간**(Interval / Duration): 측정 간격과 전체 시간입니다. 한 번의 탐색이 약 0.06~0.4 초 걸리므로 간격은 0.5 초 정도가 적당합니다.
- **결과**: 왼쪽 플롯은 시간에 따른 전압이고, 오른쪽은 탐색에서 얻은 노드의 출력 저항입니다. 출력 저항은 저장 파일에도 함께 적힙니다.



V-sense 탭의 측정 설정

I-t

고정된 바이어스에서 시간에 따른 전류를 측정합니다.

- **샘플 간격**(Sample interval): **밀리초** 단위이며 정밀 타이머로 동작합니다. 최소 **2 ms**입니다. 2 ms 간격을 지키려면 레인지를 고정하고 NPLC 0.025, 오프셋 재측정 끔으로 두십시오(판독 한 번 약 1.6 ms). AUTO 레인지(약 2.1 ms)처럼 판독이 간격보다 길면 탭이 알려 주고, 실제로 달성한 간격을 기록합니다.
- **측정 시간**(Duration): 전체 측정 길이입니다.

간격을 정하시기 전에 NPLC 옆에 표시된 점당 비용을 확인해 주십시오.

I-t 탭의 측정 설정

Mem LTP/LTD

Potentiation과 depression을 측정합니다. SET 펄스 열을 인가하면서 매 펄스 뒤에 읽고, 이어서 RESET 펄스 열을 같은 방식으로 인가합니다. 이 한 쌍이 **한 사이클**입니다.

- **V_set (강화) / V_reset (억제)**(V_set (potentiation) / V_reset (depression)): 두 구간의 펄스 진폭입니다. 부호는 입력하신 그대로 인가되며, 프로그램이 임의로 붙이거나 떼지 않습니다. 통상적인 바이폴라 멤리스터라면 V_reset에 직접 음수를 적어 주십시오.
- **강화 펄스 수 / 억제 펄스 수**(# potentiation pulses / # depression pulses): **한 사이클 안의** 펄스 개수입니다.
- **사이클 수**(# cycles): 위의 pot/dep 쌍을 몇 번 반복할지 정합니다. 기본값은 1입니다. 재현성을 보시려면 2~3 사이클을 권합니다.
- **펄스 폭**(Pulse width), **펄스 간격**(Pulse interval, 최소 2 ms): 펄스 자체의 폭과, **한 펄스가 시작해서 다음 펄스가 시작되기까지의** 간격입니다. 펄스, 읽기 안정화, 읽기, 휴지가 모두 이 간격 안에서 일어납니다.

- **V_read**, **읽기 안정화 시간**(Read settle): 읽기 바이어스와, 그 지점에서 샘플링 전까지 기다리는 시간입니다.
- 펄스가 실제로 어떤 시각에 나가는지는 아래 "펄스 타이밍" 항목을 참조하십시오.

반복은 하나의 긴 펄스 열로 처리됩니다. 사이클 경계에서도 펄스 간격이 그대로 유지되므로, 소자가 방향을 뒤집는 바로 그 자리에 요청하지 않은 휴지 구간이 끼어들지 않습니다.

그래프의 가로축은 런 전체를 통한 펄스 번호입니다. 예를 들어 50 + 50 펄스를 3 사이클 돌리면 potentiation 구간이 1₩~50, 101₩~150, 201₩~250에 그려지고 그 사이를 depression 구간이 채웁니다. 사이클마다 별도의 선분으로 그려지므로 한 사이클의 끝과 다음 사이클의 시작이 이어져 버리지 않습니다.

가로축이 이산적인 펄스 번호이므로 **점과 선을 함께 그립니다.** 점 하나가 펄스 하나와 그 뒤의 읽기 하나에 대응하고, 점 사이의 선은 측정된 값이 아니라 이어 그린 것입니다. 점이 서로 겹칠 만큼 많아지면(대략 800개를 넘으면) 점은 정보를 주지 못하므로 선만 그립니다.

저장되는 CSV에는 `cycle` **열**이 있어서(1부터 시작합니다) 사이클별로 나누어 분석하실 수 있고, 메타데이터에는 사이클당 펄스 수와 사이클 수, 그리고 총 펄스 수가 함께 기록됩니다.

Mem LTP/LTD 탭의 측정 설정

Mem Endurance

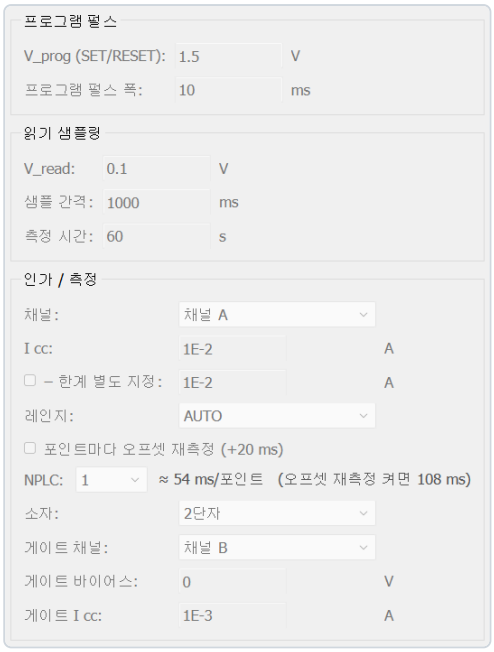
SET과 RESET을 번갈아 인가하고 각각 뒤에 읽으며, 지정한 사이클 수만큼 반복합니다. 진폭과 폭 모두 SET과 RESET이 서로 달라도 됩니다.

Mem Endurance 탭의 측정 설정

Mem Retention

프로그래밍 펄스를 한 발 인가한 뒤, 지정한 기간 동안 일정 간격으로 읽습니다.

- **V_prog**, **프로그램 펄스 폭**(Program width): 상태를 결정하는 단일 SET 또는 RESET입니다.
- **샘플 간격**(Sample interval): 밀리초 단위이며 I-t와 같은 정밀 타이머를 씁니다.



Mem Retention 탭의 측정 설정

3단자 소자: 게이트에 고정 전압 걸기

Mem LTP/LTD, Mem Endurance, Mem Retention 세 탭 모두 **소자**(Device) 를 `3단자 (게이트 바이어스)` (3-terminal (gate bias)) 로 바꾸면 다른 채널이 게이트를 잡습니다. Mem LTP/LTD 에서는 이 항목이 `3단자 (FET)` (3-terminal (FET)) 입니다. memtransistor 처럼 동작점이 있어야 의미가 생기는 소자를 위한 것입니다.

컨트롤	뜻
게이트 채널(Gate channel)	게이트를 맡을 채널. 읽기 채널과 **같을 수 없습니다**
게이트 바이어스(Gate bias)	게이트가 머무는 전압
게이트 I cc(Gate I cc)	게이트 쪽 전류 제한. 드레인과 별개입니다

게이트 전압은 **측정 시작 시 한 번 걸고 끝까지 유지합니다.** Retention 에서 도중에 게이트가 움직이면 감쇠의 대상이 바뀌기 때문입니다.

게이트 I cc 는 드레인과 따로 두십시오. memtransistor 의 게이트는 드레인보다 훨씬 작은 전류만 견딥니다.

펄스 인가 대상(Pulse to) 은 LTP/LTD 에만 있어 펄스 열을 게이트로 보낼 수 있습니다. 임의의 펄스 열을 어느 전극에든 보내시려면 아래 Pulse Sequence 탭을 쓰십시오.

EPSC / PPF

Paired-pulse facilitation과 excitatory postsynaptic current를 측정합니다.

- **대기 시간 (ms)**(Delays (ms)): 쉼표로 구분한 펄스 간 간격이며, 항목 하나가 트레이스 하나입니다.
- **펄스 수**(Number of pulses), **펄스 크기**(Pulse amplitude), **펄스 폭**(Pulse width).
- **펄스 시작 시각**(Pulse start), **측정 시간**(Measurement time): 트레이스 안에서 펄스 열이 시작되는 시점과, 트레이스 전체의 길이입니다.

- **펄스 인가 단자**(Pulse on) *(3단자일 때만 활성)*: **펄스가 걸리는 단자**를 고릅니다.

마지막 항목을 확인하십시오.

EPSC / PPF 탭의 측정 설정

선택	펄스가 가는 곳	펄스 사이 복귀 레벨	게이트
게이트 (평소 Vgs)(Gate (rests at Vgs)) (기본)	게이트 채널	Vgs	자기 자신
읽기 / 드레인 (평소 Vds)(Read / drain (rests at Vds))	읽기 채널	**Vds**	Vgs로 고정, 출력 ON

시냅틱 트랜지스터라면 게이트가 맞습니다. **멤트랜지스터에서는 읽기 / 드레인이 맞습니다.** 거기서는 스위칭하는 단자가 드레인이므로, 펄스가 전류를 읽고 있는 바로 그 채널에 걸려야 합니다.

펄스 사이에 채널이 돌아가는 레벨은 **자기 단자의** 기준 전압입니다. PPF 에서 A1 과 A2 를 재는 기준선이 그 레벨이기 때문입니다.

펄스가 걸린 단자는 메타데이터에 기록됩니다.

Pulse Sequence

파일에 적힌 임의의 펄스 열을 그대로 인가합니다. 다른 메모리스터 탭들은 실험의 형태가 정해져 있습니다. LTP/LTD 는 potentiation 다음 depression, Endurance 는 SET/RESET 쌍, Retention 은 한 발과 감쇠입니다. 이 탭은 형태를 모릅니다. 물리적 저장고 컴퓨팅처럼 **입력 자체가 펄스 열**인 경우를 위한 것입니다.

입력 파일

예제 파일 셋과 만드는 방법 설명이 `docs/pulse_sequence/` 에 있습니다. 설치하시면 앱 폴더의 `examples/pulse_sequence/` 에도 같은 파일들이 들어갑니다. `CSV_만드는_방법.txt` 의 마지막 절은 AI 에게 그대

로 붙여 넣으시도록 만들어 두었으니, 직접 작성하기 번거로우시면 활용하십시오. 같은 내용의 영문판이 `HOW_TO_WRITE_A_CSV.txt` 입니다.

첫 줄에 열 이름, 그 뒤에 펄스마다 한 줄입니다.

```
v,width_ms,interval_ms,label
0.8,10,200,in
-0.4,10,200,in
1.2,5,200,in
```

- `v` **만 필수** 입니다. 나머지는 탭의 기본값에서 채웁니다. 숫자 한 줄로 된 파일도 그대로 읽힙니다.
- 열은 **이름으로** 찾습니다. 순서가 달라도, 다른 열이 섞여 있어도 같게 읽힙니다. 다른 곳에서 내보낸 데이터를 손보지 않고 쓰실 수 있습니다.
- 쓸 수 있는 이름: `v` (또는 `v1`, `amplitude`, `amp`), `v2`, `width_ms`, `interval_ms`, `label`
- Excel 이 붙이는 UTF-8 BOM 은 그대로 처리합니다.

진폭 열이 없거나, 숫자가 아닌 값이 있거나(몇 번째 줄 어느 열인지 알려 드립니다), 비어 있는 파일은 **거부합니다.** 폭이 2 ms 하한보다 작은 펄스는 경고만 합니다. 입력한 숫자는 바꾸지 않습니다.

Pulse Sequence 탭의 측정 설정

불러오면 요약이 표시됩니다. 펄스 수, 진폭 범위, 폭과 간격 범위, **총 소요 시간**, 하한 미만인 펄스 수입니다.

채널 역할

채널 A 역할(Ch. A role)과 **채널 B 역할**(Ch. B role)에서 두 채널 각각을 고릅니다.

역할	동작
펄스 (시퀀스를 따름)(Pulse (follow sequence))	시퀀스를 따릅니다. 진폭·폭·간격이 요소마다 다를 수 있습니다
고정 전압(Constant voltage)	지정 전압을 시작할 때 한 번 걸고 끝까지 유지합니다
꺼짐(Off)	구동하지 않습니다

전류를 읽는 채널은 구동되어야 하므로 `꺼짐` 으로 둘 수 없습니다. 양쪽 모두 `펄스` 로 두면 자유도가 가장 높습니다.

두 채널의 펄스는 **약 0.05 ms(최대 0.07 ms) 차이**로 시작합니다. 진폭 명령이 채널마다 따로 전송되기 때문입니다. 실제 간격은 펄스마다 재어 로그와 저장 파일에 적습니다.

저장

다른 탭들과 같은 어간으로 네 파일이 나옵니다. 측정 CSV, 펄스 기록 CSV, 메타데이터 `.md`, 화면 캡처입니다. `.md` 에는 **입력 파일의 이름과 전체 경로**가 적힙니다.

펄스 타이밍

세 메모리스터 탭과 Pulse Sequence 탭은 같은 엔진을 씁니다. PC 의 작업 스레드가 절대 시각 기준 타이머로 각 위상의 마감 시각까지 기다립니다.

- 펄스 폭의 하한은 약 **2 ms** 입니다. 그 아래에서는 시리얼 왕복 시간 때문에 요청보다 넓게 나옵니다. 앱은 경고만 하고 입력한 숫자를 바꾸지 않습니다.
- 실제로 나온 폭은 펄스마다 측정되어 `_pulses.csv` 에 기록되고, 최악 편차는 `.md` 에도 한 줄로 적힙니다.
- 늦게 시작한 펄스는 세어서 보고하고, 뒤 펄스를 빠르게 돌려 보상하지 않습니다.
- 기록되는 폭과 시각은 PC 의 시계로 잰 값입니다. 오실로스코프로 검증한 값은 아닙니다.

Debug

전압을 걸고 전류를 읽고 실시간 값을 보는 직접 제어 화면입니다. 픽스처를 점검하실 때 유용합니다. 측정 모듈이 아니며 저장 기능도 없습니다.

---

9. 저장되는 것

완료 시 자동 저장(Auto-save on completion)은 기본으로 켜져 있습니다. 측정이 끝날 때마다 지정하신 폴더에 시각이 붙은 파일 이름으로 다음을 기록합니다.

파일	내용
`<base>.csv`	데이터
`<base>_pulses.csv`	펄스마다 한 줄. 펄스를 쓰는 탭에서만 나옵니다
`<base>.md`	모든 파라미터와 실행 헤더
`<base>.jpg`	완료 시점의 창 전체 스크린샷

`_pulses.csv` — 각 펄스가 실제로 무엇을 했는가

Mem LTP/LTD, Mem Endurance, Mem Retention, Pulse Sequence 네 탭이 이 파일을 함께 남깁니다. 열은 이렇습니다.

```
idx, label, v_req [V], v2_req [V], width_req [ms], width_act [ms], slot [s], start [s]
```

`width_act` 는 **실제로 나온 폭**입니다. 펄스가 끝나는 시점의 기록에서 측정한 값이며, 요청값과 나란히 놓여 있습니다. `slot` 은 그 펄스가 겨냥한 격자 위 시각, `start` 는 실제로 시작한 시각입니다. 두 값의 차이가 그 펄스가 얼마나 늦었는지를 말해 줍니다.

> 파형을 기록한 것이 아니라 위상 경계마다 한 점입니다. `v2_req` 는 두 채널을 모두 펄스로 쓸 때만 채워집니다.

`.md` 파일에는 입력하신 값과 함께 **실제로 무슨 일이 있었는지**가 기록됩니다.

```
Module:            I-V sweep
Channel:           1
Range:             1 µA
Compliance:        1E-3 A
NPLC:              1
ADC autozero:      off
Smart NPLC:        off
Median filter:     off
Voltage reached:   yes
temp_start_C:      41.20
temp_end_C:        41.53
temp_delta_C:      +0.33
temp_stable:       true
Started:           2026-10-17T19:15:12
Ended:             2026-10-17T19:16:30
Duration:          78.2 s (1 min 18.2 s)
```

`Started`, `Ended`, `Duration`은 측정 시작과 끝, 걸린 시간입니다. 측정 중의 온도 변화는 `temp_stable`로 기록됩니다.

`Settle after a set-point change`는 전압을 바꾼 뒤 판독 전까지 기다린 최소 시간(1 ms)과, 장비가 기다렸는지(`firmware`) 앱이 기다렸는지(`host`)를 적습니다.

- **`Voltage reached`**: 출력이 명령한 전압에 도달했는지를 적습니다. 도달하지 못한 점이 있으면 측정 중에도 채널마다 한 번씩 로그에 알리고, 그 점의 전류를 컴플라이언스와 비교하여 두 경우를 구별합니다.

전류	로그	뜻
컴플라이언스의 80 % 이상, 또는 범위 초과(over range)	파란 글씨 `ℹ … in current compliance`	장비가 설정대로 전류를 제한한 것입니다. 그 점부터는 그래프의 전압에 있지 않습니다
컴플라이언스의 80 % 미만	빨간 글씨 `⚠ … NOT compliance`	전류 제한으로 설명되지 않습니다. 배선과 탐침 접촉, 다른 채널이나 다른 장비가 그 노드를 끌고 있지 않은지 확인하십시오

메타데이터에는 두 경우의 점 개수가 함께 적힙니다.

스크린샷은 조작자가 무엇을 보고 있었는지를 남깁니다. 로그와 그때 떠 있던 경고까지 포함되며, 이 맥락은 CSV에 들어 있지 않습니다.

---

10. 캘리브레이션과 재교정 시점

캘리브레이션이라고 불리는 것이 두 가지 있고, 둘은 서로 대체할 수 없습니다.

공장 게인 캘리브레이션은 장비의 EEPROM에 들어 있습니다. SemiOtter가 전용 지그와 소급성 있는 기준기로 수행하며, `*IDN?`이 보고하는 날짜가 함께 찍히고, 펌웨어를 갱신해도 살아남습니다. 앱에서 이것을 건드리는 기능은 없습니다.

현장 영점은 사용자의 몫이며 픽스처에 속합니다. 작업이 요구하는 만큼 현장 영점(Field zero) 버튼으로 다시 잡으시면 됩니다. §4가 이쪽에 대한 설명입니다.

재교정을 위해 장비를 보내야 할 때

- 정기적으로 1년마다.
- 수리나 보드 수준의 정비를 받은 뒤에.
- 실험실에서 추적하는 검증 수치가 §11의 범위를 벗어나기 시작할 때.

---

11. 정확도

아래 수치는 실측값입니다.

전압

출력에서의 DAC 분해능	1 LSB당 **3.05 mV**
달성 가능한 최선의 정적 정확도	**±1.53 mV** (½ LSB)
캘리브레이션 후 0점 오차	약 1.5 mV

전압 정착에는 이력이 남습니다

출력은 긴 꼬리를 그리며 이완하고, 그 꼬리가 최근에 출력이 어디에 있었는지를 기억합니다. 같은 채널, 같은 설정점, 같은 펌웨어에서 다음과 같이 나옵니다.

+50.0 V 에서의 오차, 직전 위치	2초 후	약 6초 후
+20 V	−10.6 mV	−1.3 mV
+48 V	−1.1 mV	−1.4 mV
0 V	−17.2 mV	−2.0 mV
+80 V	−0.6 mV	−1.3 mV

단독으로 인가하면 약 1.6초에 1 LSB 이내로 정착합니다. 큰 폭으로 옮긴 직후에는 위 표처럼 더 오래 걸립니다. 밀리볼트 정확도의 고전압이 필요하시면 계단마다 대기 시간을 몇 초로 늘리십시오.

전류

in-situ 캘리브레이션 후 1 µA 레인지 정확도	0.08% 이내

영점 안정도	0.1 nA 이하

12. 문제 해결

증상	원인	조치
시리얼이 `SN0000`으로 나옴, 또는 연결할 때 `no factory calibration` 경고	공장 캘리브레이션을 거치지 않은 장비	SemiOtter로 연락
연결을 눌렀는데 `Not connected`로 끝남	선택한 포트의 장치가 Otter I-V Expert가 아니거나 응답하지 않음	다른 포트를 고르거나, 장비 전원과 USB를 확인
펌웨어가 뒤처져 있다는 경고	구버전 펌웨어	상태 표시줄의 **펌웨어 업데이트**(Firmware update) 단추, 또는 **도움말 → 장비 펌웨어 업데이트...**(Help → Update instrument firmware...) (§16)
저전류에서 주기적인 흔들림	상용 전원 주파수 설정 오류	`Mains:` 줄이 실제 전원과 일치하는지 확인
픽스처를 옮긴 뒤 영점이 이상함	현장 영점은 픽스처에 속함	프로브를 내리고 소자를 뺀 상태로 다시 잡기
전류가 레인지 끝에서 평평하게 잘림, CSV `note` 열에 `over range`	고정한 레인지가 좁음	더 넓은 레인지나 AUTO로 다시 측정 (§7의 "레인지")
`E402`로 출력이 꺼짐	1 µA·20 µA 레인지에서 컴플라이언스가 100 µA보다 크게 설정된 채 전류 증폭기가 포화됨. SCPI로 직접 제어할 때만 생김	더 넓은 레인지나 AUTO, 또는 컴플라이언스를 100 µA 이하로
전압 미도달로 측정이 중단됨	컴플라이언스 제한, 또는 출력이 구동할 수 없는 부하	컴플라이언스 설정과 부하를 확인
스코프로 본 펄스 폭이 다름	펄스 폭의 하한이 약 2 ms	펄스를 넓히기 (§8의 "펄스 타이밍")
`E403` 으로 출력이 꺼짐	출력 증폭기의 자체 보호(과열 또는 고장)	부하와 회로(다른 장비가 노드를 밀고 있지 않은지)를 확인한 뒤 출력을 다시 켬
`E403` 뒤에 `E702`	증폭기가 과열로 차단되었다가 식음	열이 난 원인(큰 전류를 오래, 또는 다른 장비와의 충돌)을 없앤 뒤 다시 켬
로그에 `E701`	다른 장비 또는 시료 자체(태양전지 등)가 이 노드에 전력을 밀어 넣고 있음. 측정은 멈추지 않음	§7의 *다른 SMU 와 함께 쓸 때*
컴플라이언스 점의 전류가 제한값의 90~98 % 로 읽힘	정상 동작(소프트웨어 컴플라이언스 루프)	§7 참조. 하드웨어 클램프를 보려면 `:SOUR<N>:CURR:MODE HW`
첫 실행에서 Windows가 exe를 차단	서명되지 않은 실행 파일	§2의 *첫 실행*

문제를 알려 주실 때

다음 두 가지를 함께 보내 주십시오.

빌드 라벨. 도움말 → Otter I-V Expert 정보(Help → About Otter I-V Expert)에 `20260819_180000+6229767` 형태로 나옵니다. 빌드 시각과 소스 커밋입니다. 끝에 `-dirty`가 붙어 있으면 그것도 함께 적어 주십시오.

로그 파일. 도움말 → 로그 폴더 열기(Help → Open log folder)가 로그 폴더를 엽니다. **나만 사용**으로 설치했거나 폴더만 풀어서 쓰면 실행 파일 옆의 `logs\` 이고, **모든 사용자**로 설치했으면 `%LOCALAPPDATA%\OtterIVExpert\logs\` 입니다.

파일	기록 시점	내용
`console_<시각>.log`	실행 내내, 줄마다 기록	콘솔에 나온 모든 것. SCPI 통신 포함
`session_<시각>.log`	앱을 닫을 때	로그(Log) 창의 내용
`crash_<시각>.log`	예상하지 못한 오류가 났을 때만	전체 트레이스백과 빌드 라벨

앱이 예기치 않게 종료되었다면 `crash_` 파일이 있습니다. **그 파일을 첨부해 주십시오.**

앱이 죽어도 장비는 마지막 명령이 남긴 상태를 유지합니다. 다시 연결하시기 전에 장비의 출력 상태를 확인해 주십시오.

---

13. 명령창에서 측정 실행하기

같은 실행 파일이 창을 열지 않고도 측정을 수행합니다. 첫 인자로 `cli` 를 주시면 됩니다. 인자 없이 실행하시면 창이 열립니다.

```
OtterIVExpert.exe cli list
OtterIVExpert.exe cli iv --v-start -1 --v-stop 1 --v-step 0.1 --csv out.csv
```

왜 필요한가

세 가지 경우에 쓸모가 있습니다. 여러 소자를 같은 조건으로 반복 측정하실 때, 측정을 다른 프로그램의 일부로 넣으실 때, 그리고 사람이 화면을 보고 있지 않은 장시간 측정에서입니다.

탭에서 하시던 것과 **같은 코드가 실행됩니다.** 스윕 루프도, 펄스 엔진도, 정착 시간도 동일합니다. 화면에 그리지 않고 파일로 쓴다는 점만 다릅니다.

명령

명령	대응하는 탭
`iv`	I-V
`it`	I-t

명령	대응하는 탭
`fet-output`	FET output
`fet-transfer`	FET transfer
`retention`	Mem Retention
`endurance`	Mem Endurance
`ltp`	Mem LTP/LTD
`sequence`	Pulse Sequence
`epsc`	EPSC / PPF
`list`	연결된 장비 확인

VTC 와 V-sense 는 아직 명령창에서 실행할 수 없습니다. 프로그램에서 쓰시려면 `:MEAS<N>:VSEN?` 명령을 직접 보내 주십시오(명령어 안내서 §7).

각 명령의 인자는 `--help` 로 보실 수 있습니다.

```
OtterIVExpert.exe cli iv --help
```

실행하기 전에 확인하기

`--dry-run` 은 **장비를 건드리지 않고** 파라미터만 검사하고, 실제로 어떤 전압들이 인가될지 보여 줍니다. 긴 측정을 걸기 전에 한 번 확인하시는 것을 권합니다.

```
> OtterIVExpert.exe cli iv --dry-run --v-start -1 --v-stop 1 --v-step 0.5
5 set-points x 1 sweep(s) = 5 points
  -1, -0.5, +0, +0.5, +1
```

장비가 거부할 값은 실행 자체를 막고, 받아들이기는 하지만 측정에 손해가 되는 값은 경고합니다. 이는 앱이 입력란 옆에 띄우는 것과 같은 검사입니다.

```
> ... cli iv --dry-run --nplc 2.5
warning: NPLC=2.5 is not a whole number of mains cycles, so it does not null
the line frequency (x.5 is the worst case). Use 2 or 3.
```

저장되는 것

`--csv` 로 경로를 주시면 데이터와 함께 **같은 이름의 `.md` 파일**이 저장됩니다. 파라미터, 주변 온도, 지령 전압 도달 여부가 기록되므로 앱에서 저장한 것과 같은 수준으로 추적할 수 있습니다. 9절에 설명된 것과 같은 형식입니다.

`--csv` 를 생략하시면 데이터가 화면으로 나오므로 다른 프로그램으로 넘기실 수 있습니다.

프로그램에서 부르실 때

`--json` 을 주시면 측정 결과 전체가 기계가 읽을 수 있는 한 덩어리로 나옵니다. 파라미터, 경고, 타이밍 실측치, 모든 데이터 점이 들어 있습니다. 사람이 읽는 진행 표시는 표준 오류로 나가므로 섞이지 않습니다.

측정이 정상적으로 끝나고 장비가 오류를 보고하지 않았을 때에만 종료 코드가 `0` 입니다. 스크립트에서 성공 여부를 판단하실 때 쓰시면 됩니다.

알아 두실 점

- **현장 영점은 직접 챙기셔야 합니다.** 4절의 내용은 명령창에서 실행하실 때에도 그대로 적용됩니다.
- 장비가 하나만 연결되어 있으면 자동으로 찾습니다. 둘 이상이면 `--port COM45` 처럼 지정해 주셔야 하며, 임의로 고르지 않습니다.
- 같은 파라미터를 반복해서 쓰실 때에는 JSON 파일에 적어 두고 `--params` 로 주실 수 있습니다. 명령줄에 함께 준 인자가 파일보다 우선합니다.

---

14. 직접 작성한 코드로 장비 제어하기

장비는 USB-CDC 위에서 SCPI로 동작하므로 어떤 프로그램으로도 제어할 수 있습니다. LabVIEW, MATLAB, `pyserial` 이나 `pyvisa` 를 쓰는 Python 모두 가능합니다.

표준 측정을 자동화하시는 것이라면 먼저 13절을 보십시오. 명령창 쪽이 더 짧고, 정착 시간과 오류 처리가 이미 들어 있습니다. 아래는 표준 측정에 없는 것을 하실 때의 방법입니다.

```
import serial
s = serial.Serial('COM3', timeout=2)
s.write(b'*IDN?\n')
print(s.readline().decode())

s.write(b':SOUR1:VOLT 1.0\n')
s.write(b':SENS1:CURR:RANG 1E-6\n')
s.write(b':OUTP1 ON\n')
s.write(b':READ1?\n')
print(s.readline().decode())
s.write(b':OUTP1 OFF\n')
```

명령 문법과 오류 코드, 사용 예제는 장비와 함께 보내 드리는 **AI용 명령어 안내서**에, 명령 하나하나의 설명은 **명령어 목록**에 있습니다. 교정·진단 명령을 뺀 공개판은 홈페이지 제품 자료 (https://www.semiotteredu.com/resources-product)에서 내려받으실 수 있고, 전체판을 받지 못하셨으면 sales@semiotteredu.com 으로 요청해 주십시오.

스크립트를 작성하실 때에도 두 가지는 그대로 적용됩니다.

1. **현장 영점은 직접 잡으셔야 합니다.** `:CAL:REZERO` 가 있지만 대신 실행해 주는 것은 없습니다.

2. **줄 끝은** `\n`이고, 응답은 기계가 파싱할 수 있는 고정 ASCII입니다. `:SYST:ERR?`를 읽어 주십시오. 거부된 명령은 오직 거기에서만 그 사실을 알립니다.

---

15. 원격 제어: 자기 노트북의 Claude로 측정하기

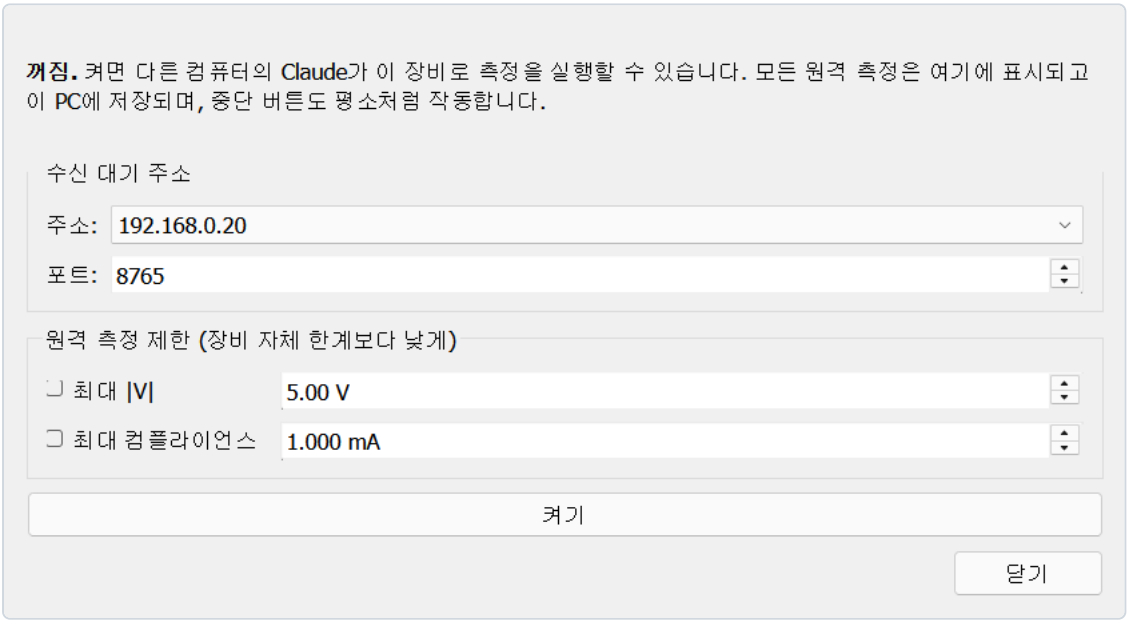
측정 PC에서 앱을 켜 두고 원격 제어를 켜면, 같은 연구실 네트워크에 있는 사람이 **자기 노트북의 Claude**(Claude Code 또는 Claude Desktop)에게 말로 측정을 시킬 수 있습니다. 측정 PC에는 누구의 Claude 계정도 로그인할 필요가 없습니다. 측정은 측정 PC 화면에 평소처럼 그려지고, 평소처럼 저장됩니다.

동작 방식

원격 측정은 **탭의 실행(Run) 버튼을 누르는 것과 같습니다.** 앱은 요청받은 값을 탭의 입력란에 채우고, 그 탭을 앞으로 가져온 뒤 실행을 누릅니다. 그러므로 화면에 보이는 값이 실제로 실행되는 값이며, 입력 검사와 저장과 메타데이터도 직접 누르실 때와 같습니다.

- 한 번에 하나의 측정만 실행됩니다.
- 원격 측정은 **완료 시 자동 저장**(Auto-save on completion) 설정과 관계없이 **항상 저장됩니다.** `.md` 파일 끝에 `## Remote` 항목이 붙어 누가(IP 주소) 시작했는지와 run id가 기록됩니다.
- 로그 창에는 `Remote run run-N started by remote <IP>`가 주황색으로 표시됩니다.

측정 PC에서 켜기



원격 제어 창

1. 평소처럼 장비를 연결합니다.
2. **원격 → 원격 제어...**(Remote → Remote control...) 를 엽니다.
3. **수신 대기 주소**(Listen on)의 **주소**(Address)에서 연구실 네트워크 주소(보통 `192.168.` 이나 `10.`으로 시작합니다)를 고릅니다. **포트**(Port)는 기본값 `8765`를 쓰시면 됩니다.

4. 필요하면 **원격 측정 제한 (장비 자체 한계보다 낮게)**(Limits for remote runs)에서 **최대 |V|**(Max |V|)와 **최대 컴플라이언스**(Max compliance)를 설정합니다. 수업에서 학생이 걸 수 있는 전압과 전류를 장비 한계보다 낮게 묶어 둘 때 씁니다. 이 한계는 Claude에게 지켜 달라고 부탁하는 것이 아니라 **앱이 검사합니다.** 한계를 넘는 요청은 탭에 손대기 전에 거부됩니다.
5. **켜기**(Turn on)를 누릅니다. URL과 **토큰**(Token)이 표시되고, 창 아래 상태 표시줄에 주황색 `원격 제어 켜짐 — …`(`Remote control ON — …`) 표시가 나타납니다.
6. URL과 토큰을 쓸 사람에게 전달합니다.

알아 두실 점이 있습니다.

- **토큰은 켤 때마다 새로 만들어집니다.** 껐다 켜면 이전 토큰은 더 이상 통하지 않으므로, 쓰는 사람도 새 토큰으로 바꿔야 합니다.
- **토큰을 아는 사람은 누구나 측정할 수 있습니다.** 쓰지 않을 때에는 꺼 두십시오. 앱을 다시 실행하면 원격 제어는 항상 꺼진 상태로 시작합니다.
- 처음 켤 때 Windows 방화벽이 허용 여부를 물을 수 있습니다. **개인 네트워크**를 허용해 주십시오. 학교 네트워크 정책 때문에 포트가 막혀 있다면 전산 담당자에게 포트 번호를 알려 주십시오.
- 학교 밖에서는 대학 방화벽 때문에 보통 접속되지 않습니다. 학교 VPN을 쓰면 접속되는 경우가 있습니다.

측정 PC 앞에 있는 사람이 우선합니다

- 원격 측정 중에도 **중단**(Abort) 버튼은 그대로 동작합니다. 원격 쪽에는 `aborted`로 보고됩니다.
- **원격 제어**(Remote control) 창에서 **끄기**(Turn off)를 누르면 진행 중인 원격 측정도 중단됩니다.
- 앱을 닫으면 원격 제어도 꺼집니다.
- **보기**(View) 메뉴에서 숨긴 탭의 측정은 원격으로 시작할 수 없습니다.

Claude Code에서 연결하기

원격 제어(Remote control) 창의 **명령 복사**(Copy command)를 누르면 아래와 같은 명령이 복사됩니다. 노트북의 터미널에 붙여 넣으시면 됩니다.

```
claude mcp add --transport http otter http://192.168.0.20:8765/mcp --header "Authorization: Bearer <토큰>"
```

토큰이 바뀌었으면 `claude mcp remove otter`로 지운 뒤 새 명령으로 다시 추가합니다.

Claude Desktop에서 연결하기

Claude Desktop은 `otter-iv-expert.mcpb` 확장 파일을 거쳐 연결합니다. 이 파일은 앱과 함께 설치되며, 측정 PC의 설치 폴더 안 `claude_desktop\otter-iv-expert.mcpb`에 있습니다. 쓰실 분의 노트북으로 복사해 주십시오. 측정 PC의 주소나 토큰은 이 파일에 들어 있지 않으므로 한 번 나눠 드리면 계속 쓸 수 있습니다.

1. Claude Desktop의 **설정 → Extensions**로 들어가, 고급 설정 쪽에 있는 **Install Extension…** 을 누르고 `otter-iv-expert.mcpb`를 고릅니다. 파일을 더블클릭하면 Windows가 어느 프로그램으로 열지 묻는데, 그 방법 대신 이 메뉴를 쓰십시오. 메뉴 이름은 Desktop 버전에 따라 조금 다를 수 있습니다.
2. 설치 화면의 **Bench address**에 URL을, **Token**에 토큰을 넣습니다.
3. Extensions 목록에서 Otter I-V Expert가 켜져 있는지 확인합니다.

claude.ai의 "커스텀 커넥터"에 URL을 추가하는 방식으로는 **연결되지 않습니다.** 커스텀 커넥터는 Anthropic의 서버에서 접속하기 때문에 연구실 내부 주소에 닿지 못합니다.

쓰는 법

새 대화에서 평소 말하듯이 요청하시면 됩니다.

> Ch. A에 1 MΩ 저항이 있어. 0~1 V를 0.1 V 간격으로 I-V 측정해서 저항값을 알려줘.

Claude는 보통 먼저 dry run으로 조건을 확인하고, 측정을 시작한 뒤 끝날 때까지 기다렸다가 데이터를 읽어 분석합니다. 도구 사용 허락을 물으면 허용해 주십시오.

무엇이 어느 채널에 연결되어 있는지는 직접 알려 주셔야 합니다. 시료를 바꿔 끼우는 일은 원격으로 할 수 없으며, Claude는 측정 결과만 보고 연결 상태를 알 수 없습니다.

Pulse Sequence는 파일 대신 펄스 목록을 직접 받습니다. 앱은 그 목록을 측정 PC의 저장 폴더에 `remote_sequence_<시각>.csv`로 저장한 뒤 **불러오기...**(Load...) 와 같은 방식으로 불러옵니다. 그러므로 어떤 펄스열을 썼는지가 데이터 옆에 남습니다.

원격으로 할 수 있는 것과 없는 것

구분	내용
원격 측정 가능	I-V, I-t, FET output, FET transfer, Mem Retention, Mem Endurance, Mem LTP/LTD, Pulse Sequence, EPSC / PPF
원격으로 불가	VTC, V-sense, Debug 탭, 현장 영점과 캘리브레이션, 펌웨어 업데이트, 설정, SCPI 명령 직접 보내기, 장비 연결과 해제
데이터	파일은 측정 PC에 저장됩니다. 원격으로는 데이터 점을 한 번에 최대 500개씩 받거나, 모양을 유지하도록 줄인 점을 받습니다. 전체 파일은 측정 PC에서 가져가십시오.

그 밖에 알아 두실 점입니다.

- **현장 영점은 측정 PC에서 챙기셔야 합니다.** 4절의 내용은 원격 측정에도 그대로 적용됩니다.
- 원격 요청에서 시간은 **초 단위**입니다(이름이 `_ms`로 끝나는 항목만 밀리초). 탭은 밀리초로 표시하는 칸이 많으므로, 화면의 숫자가 요청한 숫자의 1000배로 보일 수 있습니다. 앱이 변환한 것이므로 정상입니다.

---

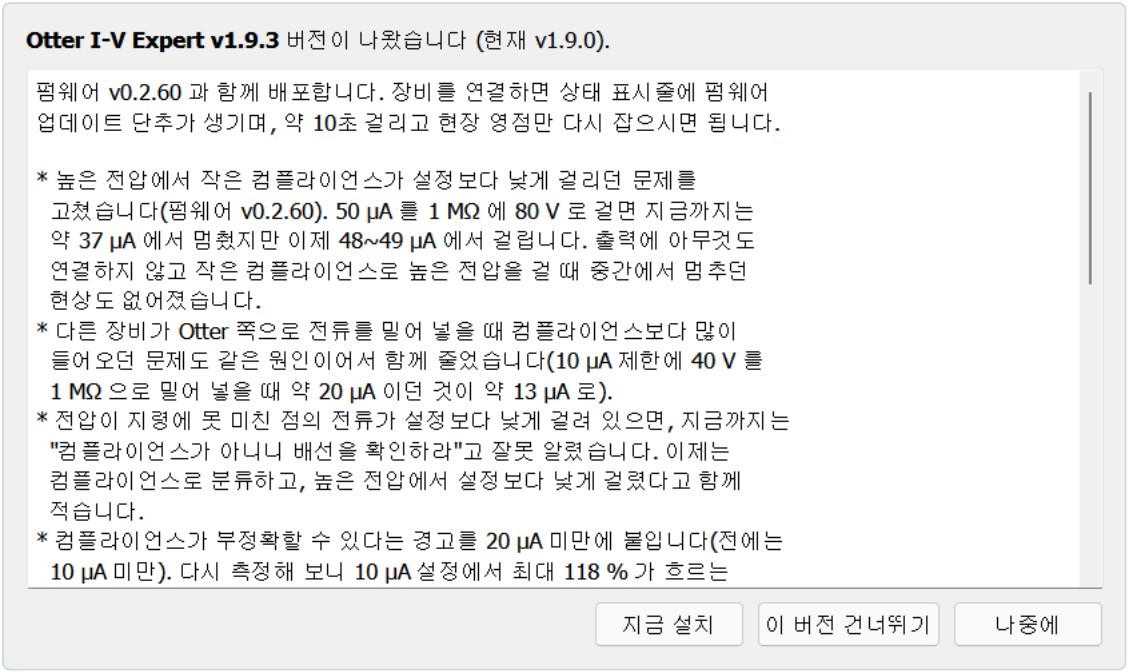
16. 업데이트: 프로그램과 장비 펌웨어

프로그램이 스스로 새 버전을 확인하고, 장비의 펌웨어도 프로그램 안에서 업데이트할 수 있습니다. 어느 쪽이든 **측정 중에는 진행되지 않습니다.** 측정, 현장 영점(Field zero) 조정, 캘리브레이션, 원격 제어 중에 누르시면 이유를 알려 드리고 기다립니다.

프로그램 업데이트

프로그램을 실행하면 몇 초 뒤에 새 버전이 있는지 한 번 확인합니다. 새 버전이 있으면 창 아래쪽 상태 표시줄에 초록색 **업데이트 있음: v…**(Update available: v…) 단추가 나타납니다. 인터넷에 연결되어 있지 않으면 아무것도 표시하지 않고 넘어갑니다.

상태 표시줄의 업데이트 단추



업데이트 창. 바뀐 내용을 보여 주고 설치 여부를 묻습니다

1. 단추를 누르시면 변경 내용이 보입니다. **지금 설치**(Install now) 를 누르십시오.
2. 설치 파일을 내려받은 뒤, 공개된 체크섬과 한 바이트도 다르지 않은지 확인합니다. 다르면 설치 파일을 지우고 실행하지 않습니다.
3. 확인을 누르시면 프로그램이 장비 출력을 끄고 종료한 다음, 설치가 진행되고 새 버전이 다시 실행됩니다.

모든 사용자 용으로 설치하신 경우(§2)에는 Windows가 관리자 권한을 묻습니다. 학생 계정이라면 관리자에게 요청하시거나, 관리자 계정으로 프로그램을 실행해서 업데이트해 주십시오.

이 버전 건너뛰기(Skip this version) 를 누르시면 그 버전은 다시 알리지 않고, 그 다음 버전부터 다시 알립니다. 자동 확인 자체를 끄시려면 **도움말 → 시작할 때 업데이트 확인**(Help → Check for updates at startup) 의 체크를 푸십시오. 언제든 **도움말 → 업데이트 확인…**(Help → Check for updates…) 으로 직접 확인하실 수 있습니다.

새 버전을 확인할 때 보내는 정보는 프로그램 버전뿐입니다. 장비의 시리얼 번호나 측정 데이터는 보내지 않습니다.

장비 펌웨어 업데이트

각 버전의 프로그램에는 그 버전과 함께 검증한 펌웨어가 들어 있습니다. 연결한 장비의 펌웨어가 그보다 오래되었으면 상태 표시줄에 주황색 **펌웨어 업데이트: v… → v…**(Firmware update: v… → v…) 단추가 나타납니다.

1. 장비를 연결하고 출력을 모두 끈 상태에서 단추(또는 **도움말 → 장비 펌웨어 업데이트…**(Help → Update instrument firmware…))를 누르십시오.
2. 시리얼 번호, 지금 버전, 설치할 버전이 표시됩니다. 확인을 누르십시오.
3. 약 10초 걸립니다. **그동안 USB 케이블을 뽑지 마십시오.**
4. 끝나면 프로그램이 장비에 다시 연결합니다.

유지되는 것	지워지는 것
공장 게인 교정값, 시리얼 번호, 상용 전원 주파수, 출력 꺼짐 모드 (모두 장비 안의 EEPROM)	현장 영점 (전원을 껐다 켤 때와 같음)

그러므로 업데이트한 뒤에는 **현장 영점(Field zero)을 한 번** 눌러 주십시오(§4).

프로그램은 지금 연결된 그 장비에만 펌웨어를 씁니다. 장비가 Otter I-V Expert라는 것과 시리얼 번호를 먼저 확인하고, 다른 Teensy 보드가 이미 펌웨어를 받을 수 있는 상태(부트로더)로 연결되어 있으면 아무것도 쓰지 않고 멈춥니다. 같은 PC에 다른 장치가 연결되어 있어도 그 장치는 건드리지 않습니다.

업데이트가 중간에 실패했을 때

1. USB 케이블을 뽑았다가 다시 꽂고, 평소처럼 연결해 보십시오. 대부분은 이전 펌웨어로 그대로 동작하거나, 다시 시도하면 됩니다.
2. 장비가 포트 목록에 나타나지 않으면 펌웨어를 받을 수 있는 상태에 멈춰 있는 것입니다. 아래 주소에서 **펌웨어 업데이트 도구**를 받아 압축을 풀고, 안에 있는 `Recover (instrument not found).bat` 을 실행하십시오. 이때는 Otter 외의 USB 보드를 모두 뽑아 두셔야 합니다.

`https://download.semiotteredu.com/otter-iv-expert/OtterFwUpdate.zip`

3. 그래도 찾지 못하면 SemiOtter로 연락 주십시오. **케이스를 열지 마십시오.**

같은 도구는 프로그램을 설치할 수 없는 PC에서 펌웨어만 올려야 할 때도 쓸 수 있습니다. 안에 든 `사용방법.md` 를 참고하십시오.

문의

support@semiotteredu.com — Semi Otter Edu Co., Ltd.