

# Lock-in Detection & Hall Effect

거쳐간 조교들

예전 매뉴얼

2012. 03. 신광우 작성

2015. 03. 황현석 개정

2017. 03. 이명원 개정

2020. 03. 이현직 개정

2022. 06. 김솔 개정

2024. 01. 고성민 개정

\* 일부 문장은 예전 매뉴얼 조교들의 텍스트 및 이미지를 그대로 가져온 것이 있으며 거쳐간 조교들에 여러 버전의 매뉴얼을 편집해 준 전 조교들을 명시하였음.

\* 통계 처리 및 회귀 분석을 위해 함께 제공되는 보조 자료인 “Error Analysis for Experimental Physicists” (2019년 조교 김솔 작성)를 참고하기를 추천함.

## 내용

실험 목적 .....	3
배경 이론 .....	3
1. Lock-in Detection .....	3
2. Filter .....	5
3. Hall Effect .....	6
장비 소개 .....	8
0. BNC 케이블 .....	8
1. 함수 발생기 (Function Generator) .....	9
2. 오실로스코프 (Oscilloscope) .....	10
3. Teachspin 사의 Lock-in Amplifier Kit .....	15
4. 홀 센서 (Hall Sensor) .....	16
실험 방법 .....	18
TASK A: Lock-in Amplifier의 구성요소 실습 및 Calibration .....	18
A-1 Preamp gain의 주파수 의존성 확인 .....	18
A-2 Phase shifter의 거동 .....	20
A-3 Lock-in detector의 DBM 실험 .....	21
A-4 Low-pass amplifier의 gain .....	21
TASK B: Lock-in Detection 실험 .....	22
B-1 FFT를 통한 Noise + signal 스펙트럼 관찰 .....	22
B-2 Lock-in detection을 통한 signal의 검출 .....	23
B-3 Lock-in detection의 DC offset stability .....	24
TASK C: Lock-in Detection을 통한 자석의 Magnetic Field 및 Dipole Moment 측정 .....	24
Troubleshooting .....	25
참고 문헌 .....	27

## 실험 목적

물리 실험은 실험 시 발생하는 신호를 검출하여 측정하는 것에 기반한다. 현실의 실험 데이터는 다양한 요인으로 인해 수많은 noise를 포함하게 되며, 이 noise는 실험 결과의 정밀한 분석을 방해한다. 이로 인해, 신호의 noise를 걸러내 원하는 값을 얻어내는 다양한 기술이 개발되어 왔으며, lock-in detection은 그중 가장 대표적인 기술이다. Lock-in detection은 간편할 뿐만 아니라 성능도 우수한 덕에 실제로 다양한 실험에서 채택되고 있다.

본 실험에서는 lock-in detection의 원리를 이해하기 위해 이를 구성하는 각종 신호 처리 장치의 작동 방식을 이해하고, noise가 섞인 signal로부터 lock-in detection으로 원본 signal을 감지하는 실습을 진행하게 된다. 또한, lock-in detection을 실제 측정에 활용하는 것을 실습해보기 위해, 자석이 만드는 자기장의 분포를 lock-in detection을 통해 측정하는 실험을 진행한다.

## 배경 이론

### 1. Lock-in Detection

Lock-in detection(amplifier)은 각종 주파수의 noise가 섞인 전기 신호로부터 원하는 주파수의 신호 세기를 검출해내는 회로이다. 즉, 교류 신호에 noise가 섞여 있을 때 원하는 신호를 검출해내는 역할을 한다. Noise를 걸러내는 일은 lock-in detection 외에도 다른 방법이 있겠지만, lock-in detection의 강점은 그 성능이 매우 우수하다는 점에 있다. 이러한 특성 때문에 때로는 실험에서 나오는 원본 신호가 시간에 따라 변하지 않는 DC 신호일 때에도, 해당 신호를 일부러 깜빡여 강제로 AC신호로 만든 후 여기에 lock-in detection을 수행하기도 할 정도이다.

Lock-in detection의 원리는 다음과 같다. 주파수가  $f_1$ 인 사인파와  $f_2$ 인 사인파를 서로 곱한 신호는 다음과 같이 적을 수 있다.

$$A \sin f_1 t \times B \sin f_2 t = \frac{1}{2} AB [\cos((f_1 - f_2)t) - \cos((f_1 + f_2)t)]$$

즉, 주파수가  $f_1 - f_2$ 인 신호와  $f_1 + f_2$ 인 신호가 합쳐진 것으로 재해석할 수 있다. 이 신호는  $f_1 = f_2$ 라면 단일 사인파에 DC offset이 가해진 것이 되고,  $f_1 \neq f_2$ 라면 두 가지 사인파가 섞인 것이 된다. 따라서, 위 신호를 저주파 신호만 통과시키는 low-pass filter에 통과시켜서 DC 또는 그에 가까운 신호만 남긴다면,  $f_1 = f_2$ 인 경우엔 필터를 통과하는 DC 성분이 있겠지만  $f_1 \neq f_2$ 인 경우엔 거의 아무 신호도 통과하지 못하게 된다.

이 점으로부터, noise가 짙게 섞인 신호에 주파수가  $f$ 인 단일 사인파를 곱한 후 이 신호를 low-pass filter에 통과시킨다면 어떤 DC 신호가 나올 것인가, 이 신호의 세기는 원본 신호에서 주파수가  $f$ 인 성분의 세기에 비례하는 정도가 나올 것임을 알 수 있다. 이 방법을 통해 noise 섞인 신호 속에서 원하는 주파수의 성분이 어느정도 되는지 알아내는 것을 **lock-in detection**이라고 한다.

이하 원본 신호는  $V_{in}$ , 사인파 형태인 reference signal은  $V_{lo}$ 라고 한다. 앞선 설명에서는  $V_{in}$ 과  $V_{lo}$ 를 곱해서 filter에 통과시킨다고 했지만, 그 대신  $V_{in} \times \text{sgn}(V_{lo})$ 를 low-pass filter에 통과시켜도 동일한 결과를 얻을 수 있다.  $V_{in}$ 과  $V_{lo}$ 가 입력되면 원하는 대로  $V_{in} \times \text{sgn}(V_{lo})$ 의 신호를 출력해주는 회로를 double balanced mixer(DBM)이라 부르며, 그림 1과 같은 구성을 갖고 있다.

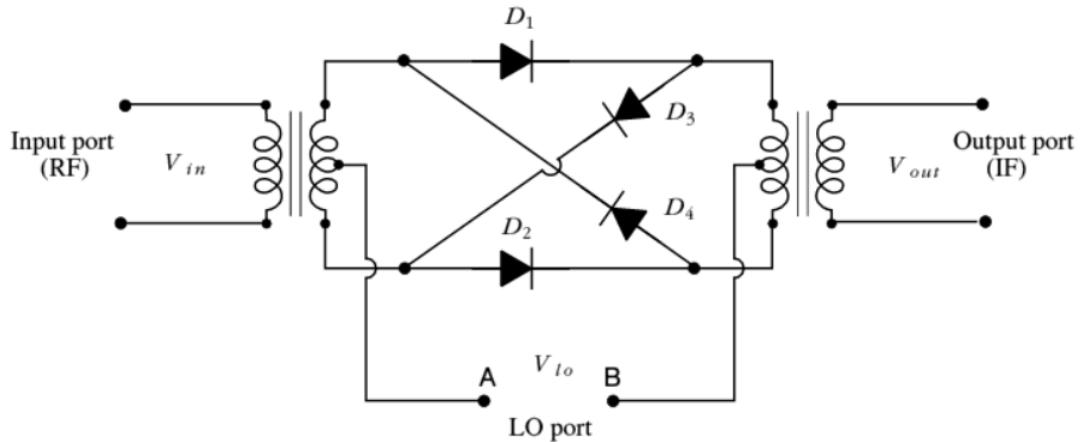


그림 1 DBM의 회로 개요도.

그림 1과 같은 mixer를 사용하면  $V_{lo}$ 가 시간에 따라 진동하는 신호일 때  $V_{in}$ 의 부호를 주기적으로 뒤집는 효과가 나타난다. 이때  $V_{in}$ 과  $V_{lo}$ 의 주파수가 정확히 일치하면  $V_{in}$ 의 부호와  $V_{lo}$ 로 인한 부호 뒤집기가 정확히 맞물려서 시간에 따른 평균이 nonzero가 되어, 마치 DC 성분이 있는 것과 같아져 low-pass filter에 투과되어도 그림 2의  $V_{out}$ 과 같이 constant signal을 남긴다. 반면  $V_{lo}$ 의 주파수 이외의 주파수를 갖는 noise는 시간 평균이 0이기 때문에 low-pass filter를 통과하지 못한다.

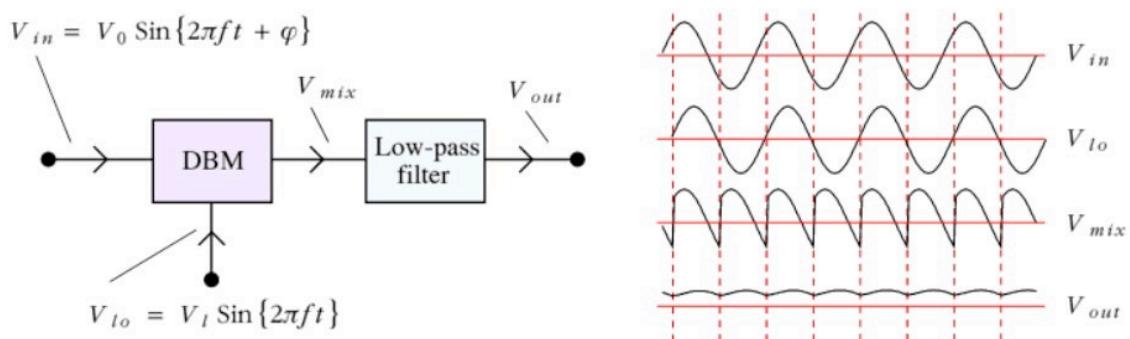


그림 2 DBM을 사용한 lock-in amplifier (detector) 회로의 개요도 및 신호 개형

Lock-in detection을 수행할 때 주의해야 하는 점이 있다. 우선, 앞서 기술했던 DC 신호를 AC 신호로 바꿔서 lock-in detection을 수행하는 경우, 실험자는 lock-in detection에 사용할 주파수를 자유롭게 선택할 수 있다. 이때 실험에 사용하는 주파수와 noise의 주파수 대역이 겹치면 lock-in detection이 효과를 발휘하지 못한다. Lock-in detection은 특정 주파수의 신호를 추출하는 기술이기

때문에, 그 주파수에 noise가 들어있으면 그 noise는 제거하지 못한다. 예시로 한국에서 전력은 60 Hz로 전달되기 때문에 noise에는 60 Hz, 120 Hz 등 60의 배수에 해당하는 주파수의 noise가 섞일 가능성이 있다. 따라서 lock-in detection에서 사용할 주파수로 60의 배수는 피하는 게 좋다.

한편, lock-in을 투과하는 신호의 세기는  $V_{in}$ 에서 검출하고자 하는 주파수 성분  $V_{lo}$ 의 **위상차에 큰 영향을 받는다**. 앞선 수식에선 두 개의 사인파를 곱해서 문제가 없었지만, sine과 cosine 신호를 곱할 경우 DC 항이 하나도 남지 않게 되어 lock-in detection을 써도 아무 신호도 검출되지 않게 된다.

$$\sin(f_1 t) \cos(f_2 t) = \frac{1}{2} [\sin((f_1 + f_2)t) + \sin((f_1 - f_2)t)]$$

위 식은 두 항이 모두 sine이기 때문에 상수항이 0이다. 따라서  $f_1 = f_2$ 더라도 low-pass filter를 통과시키면 아무 신호도 남지 않게 된다. 이 점을 유의하여 원본 신호의 원하는 주파수와 reference signal의 주파수의 위상을 적절히 맞춰서 실험해야 한다. 또는, 이를 역이용하여 원본 신호의 phase를 알아낼 수도 있다.

## 2. Filter

**Filter**는 입력된 전기 신호 중 특정 대역의 주파수만을 통과시켜 출력하는 장치이다. Filter는 다양한 주파수가 섞인 신호가 입력되면, 입력된 신호의 각 주파수에 따라 그 세기를 변화시켜 출력하게 된다. 이때, 주파수에 따른 입력과 출력의 세기 비율을 **전압 이득(gain)**이라 한다.

Filter의 종류에 따라 주파수에 따른 gain이 달라지게 된다. Filter는 통과시키는 주파수의 대역이 저주파인지, 고주파인지, 또는 특정 대역인지에 따라 **low-pass, high-pass, band-pass filter**로 구분된다. 여기서, low-pass filter는 낮은 주파수의 신호를 통과시킨다고 할 수도 있지만, 입력된 신호의 시간 적분 기댓값 만을 남기는 것으로도 생각할 수 있다. 쉽게 말하면, 입력된 신호가 고정된 세기의 직류 신호와 다양한 주파수의 진동이 섞인 교류가 혼합된 형태라면, low-pass filter는 이 중 직류 신호만을 남긴다는 것이다. Lock-in amplifier에선 이러한 low-pass filter의 특성을 활용하여 검출하고자 하는 신호의 세기를 계산하게 된다.

Filter의 동작 특성을 표현하는 상수로 Q-factor, cut-off frequency, 시상수(time constant), 그리고 roll-off가 있다. **Q-factor**는 filter의 성능을 나타내는 지표로, Q-factor가 클수록 filter가 통과시키는 주파수의 대역폭이 좁아진다. 즉, 더욱 정밀하게 원하는 주파수만을 걸러낼 수 있다. **Cut-off frequency**는 filter가 투과시키는 최대/최소 주파수를 의미하며, low-pass filter에서는 filter가 투과시키는 최대 주파수이다. **Time constant**는 filter의 cut-off frequency를 결정짓는 요소 중 하나로, filter 내의 capacitance가 충전되는 속도와 관련된 지표이다. 마지막으로 **roll-off**는 filter가 가장 잘 투과시키는 주파수인 critical frequency로부터 신호의 주파수가 벗어날 때 gain이 얼마나 빠르게 감소하는지를 나타낸다. 단위는 dB/oct로, 주파수가 두 배 늘어날 때 gain이 얼마나 감소하는지를 데시벨로 나타낸 것이다.

가장 단순한 filter인 passive filter는 들어온 신호를 선택적으로 투과시키는 역할만 한다. 즉, passive filter는 모든 주파수 대역에서 gain이 1 이하이다. 그러나 본 실험에 쓰이는 filter는 증폭을 통해 출력 전압에 1보다 큰 gain을 줄 수 있도록 설계되어 있다. 또한, time constant와 roll-off도 조절할 수 있게 되어 있어 다양한 특성의 low-pass filter를 통해 lock-in detection 실험을 수행할 수 있다.

### 3. Hall Effect

Hall effect(홀 효과)란 전류가 흐르는 시료에 전류의 방향에 수직한 자기장을 걸었을 때, 시료 내에서 전류와 자기장에 수직인 방향으로 전위차가 형성되는 현상이다. 그림 3과 같이 도체 시료에 전류  $i$  를 아래 방향으로 흘려주면서, 이에 수직하게 종이를 뚫고 들어가는 방향으로 자기장  $B$  를 걸어주면, 위쪽 방향으로 올라가는 전자들은 자기장에 의해 로렌츠 힘(Lorentz force)을 받고 진행 방향이 오른쪽으로 훙다. 이로 인해 전류와 자기장에 모두 수직인 좌우 방향으로 전하가 축적되어 이 사이에 전위차가 생기게 된다. 이 현상은 전위차가 충분히 강해져서 로렌츠 힘과 평형을 이루 때까지 발생하여 시료의 양옆에는 홀 전위(Hall voltage)만큼의 전위차가 남게 된다.

평형 상태에서 시료의 양옆 전위차  $V_H$  는 다음과 같이 계산된다.

$$V_H = Ed$$

여기서  $E$ 는 홀 효과로 인해 생성된 전기장이고,  $d$ 는 시료의 좌우 폭이다.  $V_H$ 가 더 이상 변하지 않는 평형 상태에선  $E$  가 전자에 가하는 전기력과 로렌츠 힘이 평형을 이루므로, 전자의 속력을  $v$  라고 하면 다음 식이 성립한다.

$$eE = evB$$

여기에 전자의 흐름과 전류의 상관관계인  $i = -nevA$ 를 대입하면 홀 전위를 알 수 있다.

$$V_H = -\frac{id}{neA}B = -R_H iB \frac{d}{A}$$

여기서  $n$ 은 전하 운반자 밀도(carrier density),  $A$ 는 시료의 단면적이다.  $R_H$ 는 홀 상수(Hall coefficient)이며  $1/ne$ 로 정의되며, 전류와 자기장의 세기에 따라 홀 전압이 얼마나 강해지는지를 의미한다.

홀 전압을 활용하여 자기장의 세기를 측정할 수 있다. 홀 센서는 이러한 홀 효과를 활용해서 자기장의 세기를 측정하는 센서이다. 홀 전위는 시료에 걸리는 자기장의 세기에 비례하므로, 시료의

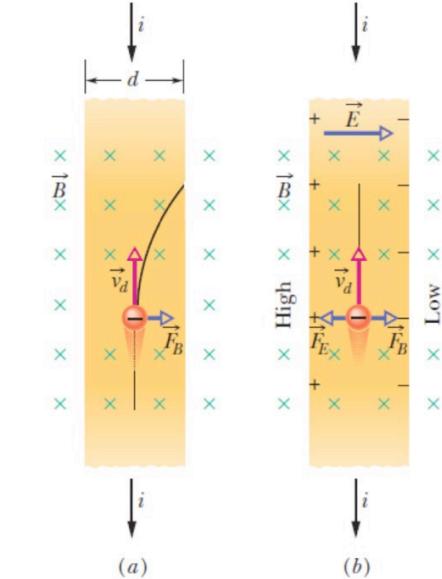


그림 3 홀 효과

양단에 걸리는 전위차를 통해 자기장을 측정하는 원리이다. 하지만 실제 홀 전압의 세기는 매우 약하기 때문에 단순하게 측정하려 하면 noise에 묻혀 신호를 검출해낼 수 없다. 이는 lock-in detection을 활용해 측정하면 해결할 수 있으며, 본 실험에서 이를 직접 해볼 것이다.

구체적으로, 본 실험에서는 lock-in detection에 대해 배운 다음 lock-in detection을 직접 사용해 네오디뮴 자석이 축을 따라서, 그리고 축과 수직인 방향을 따라서 형성하는 자기장의 세기를 측정할 것이다. 자석을 쌍극자 모멘트가  $\vec{m}$ 인 단일 자기 쌍극자로 근사했을 때, 자석이 형성하는 자기장은 다음과 같다.

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ \frac{3\vec{r}(\vec{m} \cdot \vec{r})}{r^5} - \frac{\vec{m}}{r^3} \right]$$

위 식으로부터 자석에서 축 방향으로  $z$ 만큼 떨어진 곳에서의 자기장을 구하면 다음과 같다.

$$B(z) = \frac{\mu_0}{2\pi z^3} \vec{m}$$

자석의 축에서 수직인 방향으로  $\rho$ 만큼 떨어진 곳에서의 자기장을 구하면 다음과 같다.

$$B(\rho) = -\frac{\mu_0}{4\pi\rho^3} \vec{m}$$

자기장의 단위로는 테슬라(T)와 가우스(G)가 많이 사용되며,  $1 \text{ T} = 10^6 \text{ G}$ 이다. SI 유도 단위에서의 자기장 단위는 T이지만 이 단위는 현실에서 쓰기엔 너무 크기 때문에 일반적으로 그 1000분의 1 크기인 mT나 그보다 더 작은 G를 사용한다. 일상적으로 볼 만한 자석의 자기장 세기는 강해봤자 수천 G 정도이며, 현재 인류가 실험실에서 만들어낸 가장 강력한 자기장은 45 T 정도이다.

소개에서 설명한다.

## 장비 소개

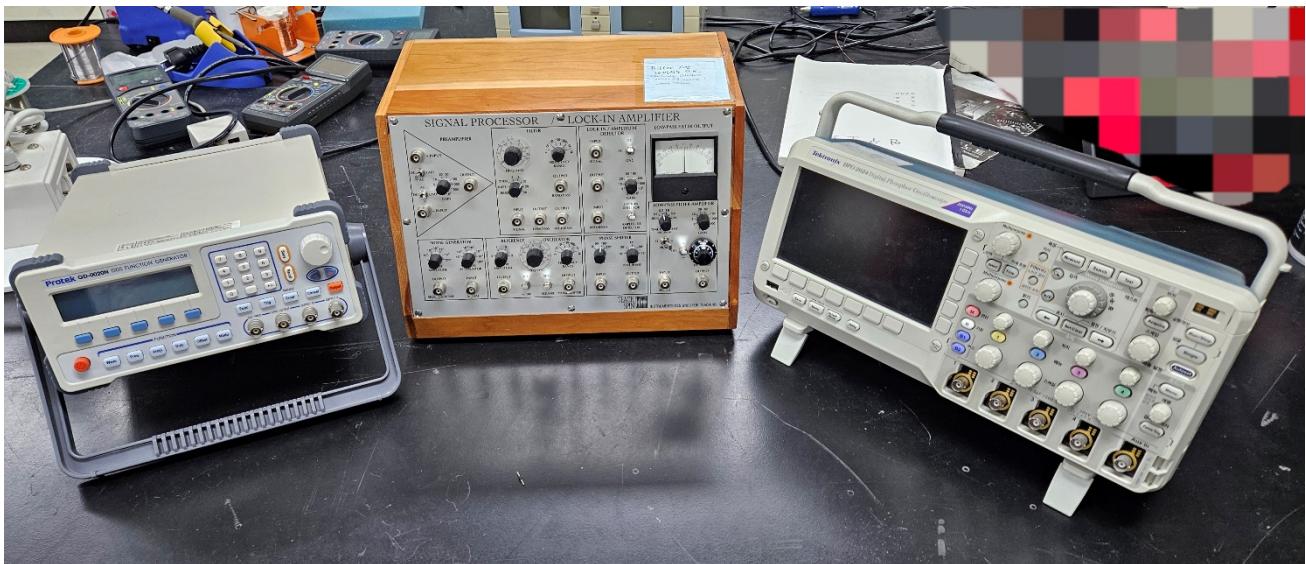


그림 4 본 실험에서 사용할 모든 장비의 모습. 왼쪽부터 function generator, lock-in amplifier kit, 오실로스코프이다.

## 0. BNC 케이블

본 실험에서 사용하는 장비들은 BNC 케이블 규격의 전선을 통해 전기 신호를 주고받는다. 그림 5와 같은 형태의 케이블을 BNC 케이블이라 하며, 축이 같은 두 개의 원통 구조로 되어 있어 하나의 전선으로도 오고 가는 전류 모두를 흘릴 수 있다.

BNC 케이블의 탈착 방법은 다음 영상에서 확인할 수 있다.  
기본적으로 꽂고 돌리고, 돌리고 빼는 방식으로 이뤄진다.

<https://youtu.be/E189roywLo8>



그림 5 BNC 케이블

본 실험에서는 하나의 전기 신호를 둘로 나눠서, 한 쪽에선 원본 신호를 보고 다른 쪽에선 신호 처리 후의 출력 신호를 봐서 둘을 비교하는 것을하게 된다. 이를 위해서는 그림 6과 같은 BNC tee를 사용하게 된다. BNC tee는 T자 모양으로 되어 있어 하나의 신호를 둘로 나눌 수 있는 장비로, 그림 6과 같이 사용하면 한 쪽의 케이블로 들어오는 입력을 두 개의 케이블로 나눠서 내보낼 수 있다.



그림 6 BNC tee를 사용하는 모습. 왼쪽으로 들어오는 입력이 뒤쪽의 preamplifier에 input으로도 들어가고, 오른쪽으로도 나가서 다른 장비의 input으로 들어가고 있다.

## 1. 함수 발생기 (Function Generator)

매뉴얼: [http://www.usedsite.co.kr/pds/file/GD Series\(국문메뉴얼\).pdf](http://www.usedsite.co.kr/pds/file/GD Series(국문메뉴얼).pdf)



그림 7 함수 발생기

함수 발생기는 원하는 파형의 전기 신호를 만드는 장비이다. 그림 7의 함수 발생기는 1 kHz 주파수, 100 mV 진폭의 sine파를 Output A로 출력하고 있다.

함수 발생기의 하단 Function 영역의 버튼을 눌러 출력하는 신호의 파형, 주파수, 진폭 등을 수정할 수 있다. 그림 5의 함수 발생기는 Freq 버튼이 눌린 상태로, 우측의 숫자 버튼을 누르거나 다이얼을 돌려서 값과 단위를 설정할 수 있다.

함수 발생기에서 설정한 출력은 함수 발생기의 Output A로 출력된다. Output B의 출력은, Func 버튼을 누르고 Ch2 항목으로 들어가서 설정할 수 있다. Output A는 설정을 바꾸는 즉시 출력이 변하지만, Output B는 OK를 눌러야 설정이 반영된다. 또한, Output B의 출력은 Func 메뉴의 Ch2 항목에서 가장 왼쪽 항목을 on으로 설정해주고 OK를 눌러야 내보내진다.

단, Output A와 Output B를 동시에 사용할 경우 두 신호의 동기화가 잘 안 되는 때가 있으니 주의가 필요하다. 본 실험 절차에서 Output B를 사용할 일은 거의 없을 것이다, 필요에 따라 Output B를 사용하게 된다면 반드시 Output A와 Output B의 출력을 모두 오실로스코프에 연결해 출력을 관찰하면서 실험을 진행해야 한다.

함수 발생기의 출력에 대한 기타 설정은 장비 매뉴얼을 참고하시오.

## 2. 오실로스코프 (Oscilloscope)

매뉴얼: <https://download.tek.com/manual/071232800web.pdf>

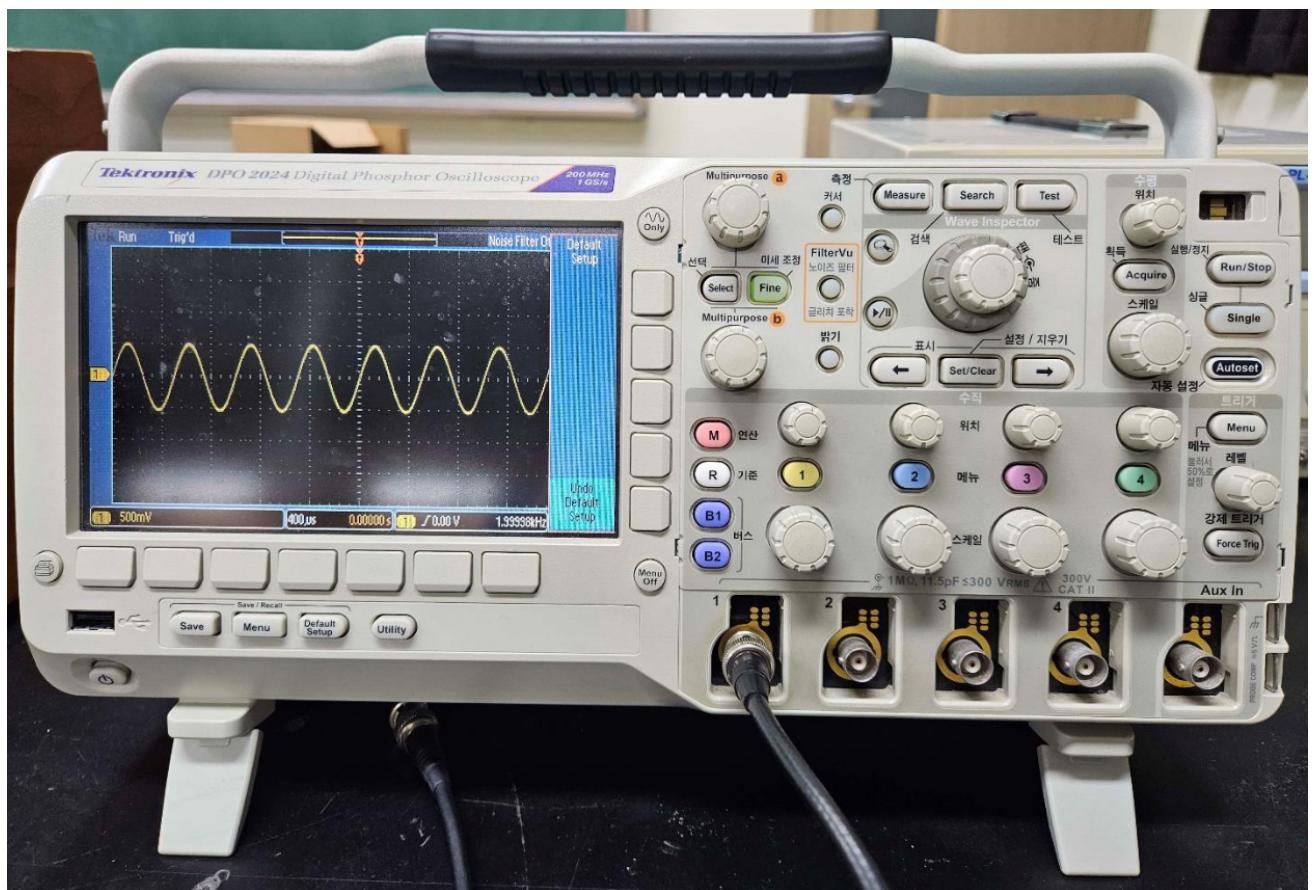


그림 8 오실로스코프

오실로스코프는 입력된 전기 신호를 화면에 표시하는 장비이다. 그림 8의 오른쪽 아래 1~4번 단자에 BNC 케이블로 전기 신호를 주면 그 신호가 화면에 표시되는 형식이다. 그림 8의 오실로스코프에는 1번 단자에 선이 연결되어 화면에 사인파가 표시되고 있다.

오실로스코프에 탑재된 기능은 매우 방대하여 모든 것을 본 매뉴얼에서 설명하기에는 무리가 있다. 따라서 오실로스코프를 처음 사용해본다면, 매뉴얼의 오실로스코프에 익숙해지기 문단을 읽어보고 실험 시작 전에 따라해보는 것을 권장한다. 본 매뉴얼에서는 기본적인 사용법 및 몇몇 troubleshooting만 설명한다.

다른 것보다 제일 중요한 것은, **직접 조작할 때에는 오실로스코프에 과전압이 걸리지 않도록 주의해야 한다.** 매뉴얼에서는 허용 진폭이 최대 40 V라고 나와 있으나, 실제 실험시에는 +5 V와 -5 V 이내의 신호만이 들어가도록 주의해야 한다. 특히 후술할 **preamplifier**와 **noise generator**를 사용할 때 실수로 과한 전압이 걸리기 쉬운데 그런 일이 없도록 해야 한다.

## 기본 설정값으로 변경

실험을 처음 시작한다면, 오실로스코프의 전원을 킨 후 이전 사용자가 사용한 설정이 남아있을 수 있다. 이렇게 되면 오실로스코프가 실험자가 원하는 세팅으로 작동하고 있는지 알 수 없다. 오실로스코프 좌측 하단의 Default Setup 버튼을 누르고 조금 기다리면 오실로스코프의 모든 세팅을 초기화할 수 있다.

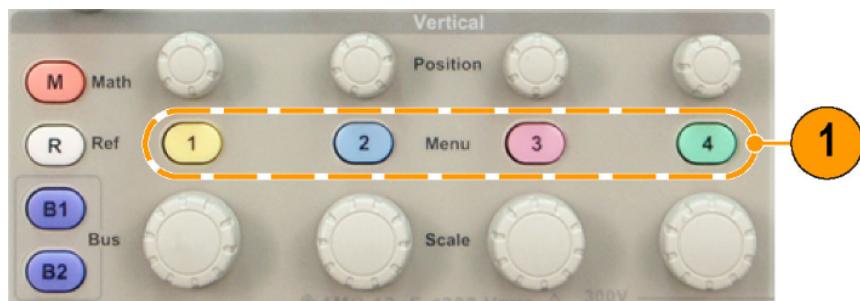


그림 9 채널 버튼

단, 본 오실로스코프에 표시되는 파형을 10배 충폭시켜서 보여주는 것을 기본값으로 하고 있다. 이를 고치기 위해, 그림 9의 채널 버튼 중 설정을 바꾸고자 하는 것을 눌러 화면에 표시되는 프로브 설정값을 1X로 수정해야 한다. 값 수정은 프로브 설정에 해당하는 버튼을 누르고 Multipurpose a 다이얼을 돌리면 된다.

## 오실로스코프의 채널

본 실험에서 사용하는 오실로스코프에는 입력받을 수 있는 단자가 4개 있다. 각 단자에는 1~4번 채널에 신호를 넣어줄 수 있도록 되어 있으며, 여러 채널을 선택적으로 오실로스코프의 화면에 표시하여 둘 이상의 신호를 한 데에 놓고 비교할 수 있다.

각 단자에 채널을 연결한 후, 단자 위에 있는 1~4라고 적힌 버튼을 눌러 각 채널이 화면에 표시되는 것을 토글할 수 있다. 또한, 각 채널의 상하좌우 위치를 그 버튼 위아래의 스케일, 위치 다이얼을 돌려서 조절할 수 있다.

## 측정 시간 스케일

오실로스코프에 표시되는 화면의 가로축은 시간이고, 세로축은 전압이다. 가로축의 범위는 오실로스코프 우측의 스케일 다이얼을 돌려서 조절할 수 있다. 오실로스코프 시동 후 단자에 케이블을 꽂아 신호를 보내줬는데 평탄한 파형만 보인다면 스케일을 먼저 돌려보는 것이 좋다. 파형이 지나치게 확대되어 진동이 보이지 않는 것일 수도 있기 때문이다.

## 둘 이상의 채널 사용 시 파형 고정이 안 되는 문제

본 실험에서는 둘 이상의 채널을 동시에 활용하는 실험이 많다. 그런데 초기 설정 상태에서는 두 채널에 신호를 입력시켜 화면에 표시했을 때 파형이 가만히 있지 않고 지직거리듯이 파형이 움직이며 표시되는 경우가 있을 수 있다. 이는 오실로스코프의 트리거가 잘못 설정되어 있기 때문이다.

트리거는 오실로스코프가 화면에 파형을 나타낼 때 사용하는 기준점을 의미한다. 오실로스코프의 우측 하단 트리거 영역에 있는 다이얼을 돌리면 그림 10와 같이 화면 오른쪽에 작은 화살표가 표시되어 위아래로 움직이는 것을 볼 수 있다. 이 높이가 트리거의 기준점으로, 오실로스코프는 해당 높이의 수평방향 직선과 파형이 겹치는 점들이 일정한 위치에 오도록 파형의 좌우 위치를 조절한다. 트리거를 파형보다 높이 두면 지직거리는 현상이 다시 발생하고, 파형의 정중앙에 두면 위상이 180도 차이나는 두 파동이 겹쳐 보이게 된다. 이 둘 사이, 그림 10에서 보이는 것과 같은 위치에 두면 파형이 정상적으로 나타난다.

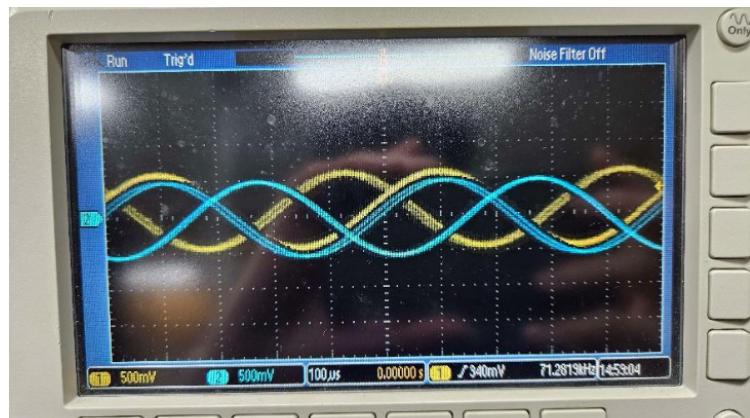


그림 10 트리거 설정 모습

그렇게 트리거를 맞췄음에도 불구하고 파형이 그림 10와 같이 파형이 겹쳐 보인다면, 이는 오실로스코프가 파형의 위치를 리셋하는 시간 간격이 너무 짧기 때문이다. 이는 트리거 홀드오프를 키움으로써 해결할 수 있다. 오실로스코프 우측 하단의 트리거 영역의 메뉴 버튼을 누르고, 화면 하단에 표시되는 Mode Auto & Holdoff를 선택하여, Multipurpose a 다이얼을 돌려 표시되는 홀드오프를 조절하면 된다. Multipurpose a 다이얼 옆의 Fine을 누름으로써 이 값을 미세하게 조정할지 말지를 토글할 수 있다. 적절한 홀드오프의 값은 주파수에 따라 달라질 수 있으므로, 파형이 겹쳐 보이는 현상이 발생한다면 그때마다 홀드오프를 다시 조절해줘야 한다.

기본적으로 위 방법대로 트리거를 조절하면 1번 채널로 들어오는 신호만을 기준으로 트리거를 맞추게 된다. 따라서 트리거를 맞춘 상태에서 1번 채널의 신호를 끊고 다른 채널의 신호만 표시하면 트리거가 맞지 않아 다시 신호가 지직거리게 된다. 이때는 트리거의 기준이 되는 채널을 변경하면 된다. 이는 트리거 영역의 Menu 버튼을 누르고, Multipurpose a 다이얼을 돌려서 Source를 원하는 신호로 변경하면 된다. 설정 후 Menu off 버튼을 누르면 모든 메뉴가 꺼진다.

이외에 트리거에 대한 더 정확하고 상세한 설명은 매뉴얼을 참고하면 된다.

## 커서

오실로스코프의 화면에 표시된 파형에서 특정 위치의 전압을 읽고 싶을 땐 커서 기능을 이용할 수 있다. 커서 버튼을 누르면 화면에 두 개의 커서가 표시되면서 화면 우측 상단에 각 커서의 위치와 전압, 그리고 두 커서 사이의 시간 및 전압 차이를 알 수 있다. 이를 통해 표시된 파형의 진폭과 주기를 알아낼 수 있다. 커서로 측정하는 채널을 바꾸고 싶으면 그 채널 번호에 해당하는 버튼을 눌러주면 된다. 예를 들어 채널 2로 들어오는 신호에 대해 측정을 하고 싶으면 파란색 2 버튼을 누르면 된다.

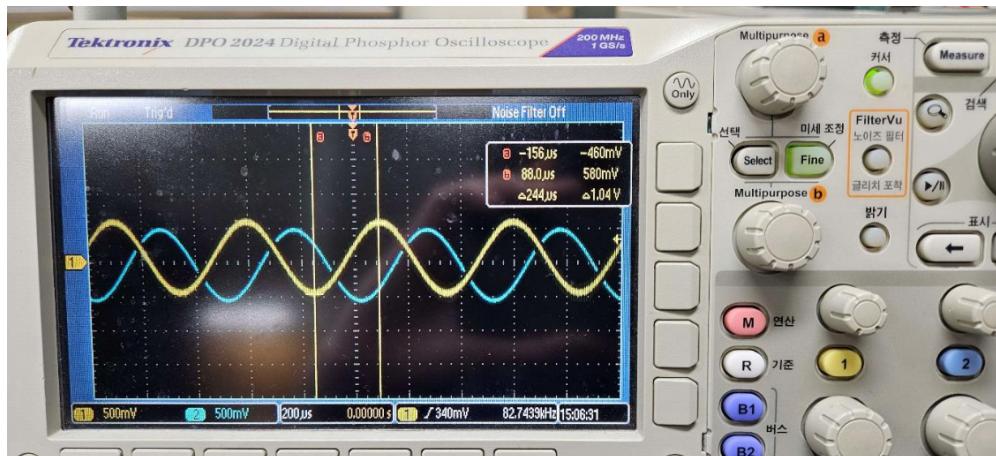


그림 11 커서를 통해 1번 채널 신호(노란색)의 진폭을 측정하는 모습. 1.04 V로 측정되고 있다.

매뉴얼에서 커서 기능을 따라해보기 형식으로 안내하고 있으므로, 설명한 기초적인 기능 외의 추가적인 설명이 필요하면 매뉴얼을 참고하길 바란다.

## 측정 (Measure)

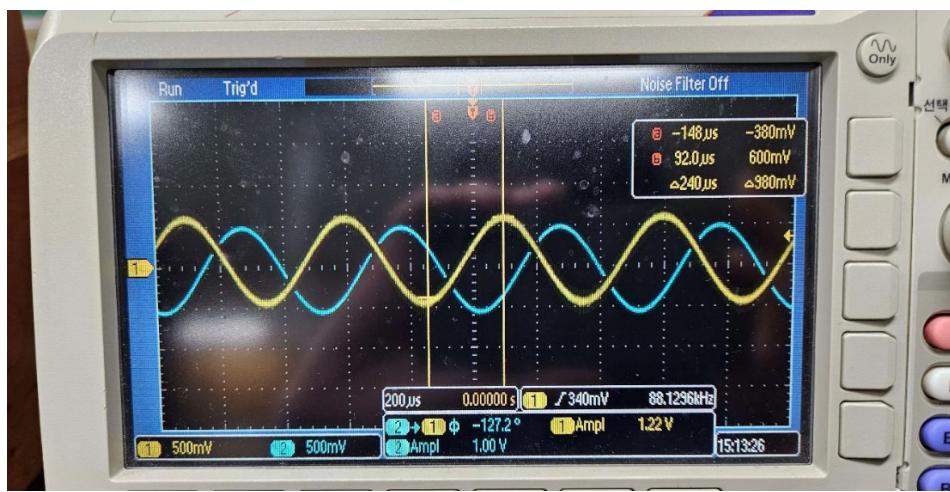


그림 12 측정 기능을 활용해 두 신호의 진폭과 위상차를 측정하는 모습 (화면 하단)

오실로스코프에 내장된 측정 기능을 활용하면 정밀한 커서 조작 없이도 간편하게 신호를 분석할 수 있다. 오실로스코프 상단의 Measure 버튼을 누르면 측정 관련 메뉴가 표시되며, 화면의 Add Measurement 버튼과 Remove Measurement 버튼을 통해 측정 항목을 추가 및 제거할 수 있다.

측정값을 추가하기 위해선 Measure 버튼을 누른 후 표시되는 Add Measurement 버튼을 누르고, Multipurpose a/b 다이얼을 통해 원하는 측정 항목과 그 대상 채널을 선택하면 된다. 설정이 완료되면 우측 하단의 OK를 누르면 선택한 측정 항목이 화면에 추가된다. 추가를 완료한 후엔 Menu Off 버튼을 누르면 기존 화면으로 돌아간다.

## 연산

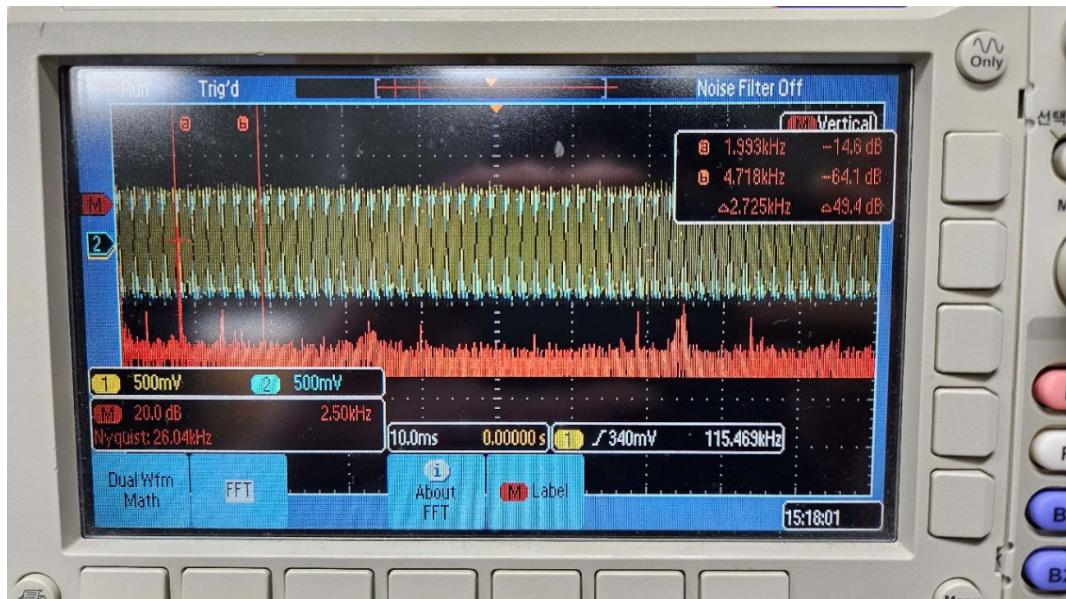


그림 13 연산 기능의 FFT를 활용해 입력 신호를 분석하는 모습.

오실로스코프에는 기본적인 측정 기능 외에도 더 복잡한 분석을 자동으로 해주는 연산 기능이 있다. 본 실험에서는 입력된 신호가 어떤 주파수로 구성되어 있는지 그 스펙트럼을 보여주는 FFT 기능을 활용한다.

오실로스코프의 붉은색 M 버튼을 누르면 그림 13과 같이 화면에 빨간색 그래프가 추가된다. 이때 화면 하단의 버튼을 조작해 그림 13과 같이 설정을 FFT로 두면, 입력된 신호에 FFT 처리를 해 빨간색 그래프로 보여준다. 여기서 Multipurpose 다이얼을 돌리면 어느 채널로 입력된 신호에 FFT 연산을 할지 결정할 수 있다.

FFT 측정 중에 커서 기능을 활용하여 그림 13과 같이 특정 주파수의 신호 세기도 측정할 수 있다. 이 기능으로 FFT 그래프의 피크를 확인할 땐 Multipurpose 다이얼로 커서를 조절할 때 Fine 모드까지 사용하여 정밀하게 조작해야 피크를 올바르게 분석할 수 있음에 유의한다.

만약 FFT 기능을 켰을 때 빨간색 그래프에 정상적인 모습이 보이지 않고 노이즈만 나타난다면, 스케일 다이얼을 돌려 그림 13과 같이 화면에 충분히 많은 신호 주기가 표시되도록 해야 한다.

오실로스코프의 FFT 기능은 화면에 보이는 영역에 대해서만 푸리에 변환을 하기 때문에, 원하는 주파수가 너무 낮으면 FFT 그래프의 왼쪽 끝에 해당 주파수의 세기가 표시되어 정상적인 분석을 할 수가 없다.

### 3. Teachspin 사의 Lock-in Amplifier Kit



그림 14 Lock-in amplifier kit

본 실험에선 Teachspin 사의 교육용 lock-in amplifier kit을 사용하여 실험을 진행한다. 이 kit은 그림 15와 같이 8가지 요소로 구성되어 있다.

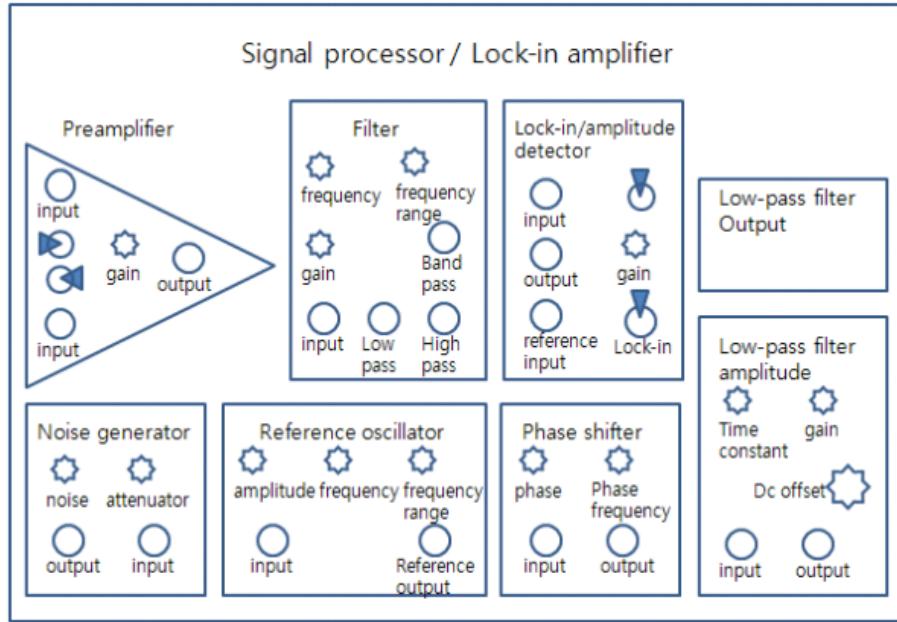


그림 15 Lock-in amplifier의 전면 개요도

이 중 lock-in amplifier를 구성하기 위해서는 그림 15의 Preamplifier, Lock-in/amplitude detector, Low-pass filter amplitude, Phase shifter 장치를 쓰게 된다. 여기서 Lock-in/amplitude detector가 상술한 DBM이다. 이번 실험에서 그림 15의 Filter는 사용하지 않으며, kit에 내장된 Reference oscillator는 성능이 좋지 않으므로 함수 발생기를 대신 사용한다.

본 kit를 사용하여 lock-in detection을 하는 과정은 다음과 같다. 원본 신호를 preamplifier로 증폭시키고, reference signal의 phase를 phase shifter를 사용하여 위상차를 맞춘다. 그런 다음 lock-in detector에 preamp와 phase shifter를 통과한 신호를 둘 다 입력한 후 그 출력을 low-pass filter에 통과시키면 된다. 그 신호를 오실로스코프에 입력해, 최종 출력된 신호의 세기를 읽으면 lock-in detection의 수행이 마무리된다.

#### 4. 훌 센서 (Hall Sensor)

본 실험에서는 Matrix Opto Co., Ltd 사의 MG910 GaAs 훌 소자를 사용하여 자기장을 측정한다. 훌 효과의 측정에는 기본적으로 4개의 전극이 필요하다. 이들 중 두 개는 전류를 흘리는 전극, 나머지 둘은 시료의 양측 전위차를 측정하는 전극이다.

## Dimensional Drawing (Unit MM)

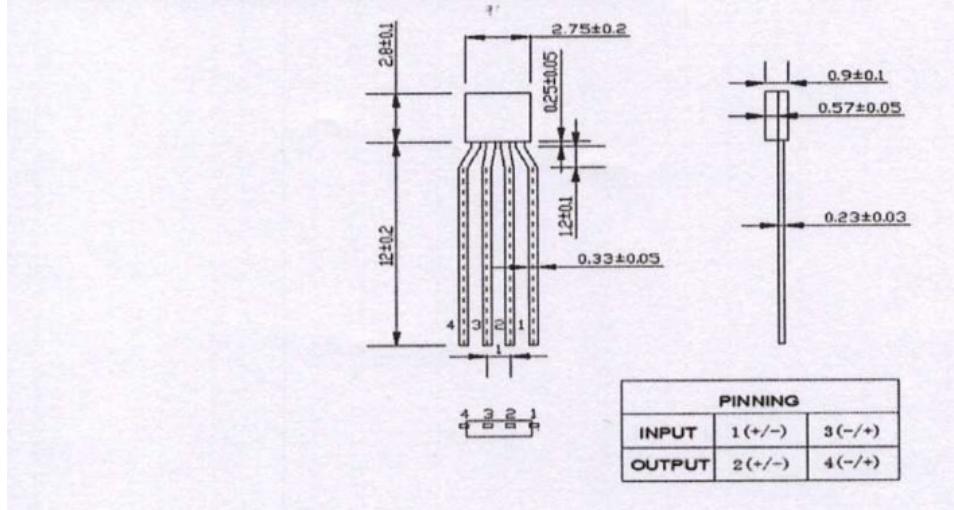


그림 16 MG910 GaAs 훌 소자의 핀 구조

그림 16은 본 실험에서 사용하는 훌 소자의 구조도이다. 1, 3번 핀이 전류를 흘리는 핀이고, 2, 4번 핀이 훌 전압을 측정하는 핀이다. 왼쪽과 오른쪽 중 어디가 1번이고 어디가 4번인지는, 그림 16의 우측과 하단에 있는 측면, 하부 모습을 보고 알 수 있다.

Table 1. Electrical Characteristics of MG910.

Item	Symbol	Test Condi.	Min.	Typ.	Max.	Unit
Hall Voltage	$V_H$	$B = 50\text{mT}$ , $I_c = 5\text{mA}$ $T_a = RT$	36	45	54	mV
Input/Output Resist.	$R_{in/out}$	$B = 0\text{mT}$ , $I_c = 0.1\text{mA}$ $T_a = RT$	650	750	850	$\Omega$
Offset Voltage	$V_{os}$	$B = 0\text{mT}$ , $I_c = 5\text{mA}$ $T_a = RT$	-5		+5	mV
Temp. Coeffi. of $V_H$	$ \alpha V_H $	$B = 50\text{mT}$ , $I_c = 5\text{mA}$ , $T_a = 25^\circ\text{C} \sim 125^\circ\text{C}$			0.06	$^\circ\text{C}$
Temp. Coeffi. of $R_{in}$	$\alpha R_{in}$	$B = 0\text{mT}$ , $I_c = 0.1\text{mA}$ , $T_a = 25^\circ\text{C} \sim 125^\circ\text{C}$			0.3	$^\circ\text{C}$
Linearity of $V_H$	$\Delta K$	$B = 0.1 \sim 0.4\text{T}$ , $I_c = 5\text{mA}$ $T_a = RT$	-1		+1	%

그림 17 RT(Room temperature, 25°C)에서의 MC910 소자의 특성

본 훌 소자에 과전류가 흐르게 되면 소자가 타서 사용이 불가능해진다. 이 경우 최대 한 번 까지만 교체가 가능하며, 실험 시작 전 고장이 확인된 경우에 한해서 최초 재지급을 포함하여 두 번 까지만 교체가 허용된다. 이 이후로 교체가 있을 시에는 조교 재량에 따라 팀 전체의 보고서 점수에 감점이 있을 수 있다. 따라서 그림 17의 데이터를 확인하여 허용 전압을 넘는 전압을 걸지 않도록 해야 한다.

## 실험 방법

실험 시작 전후로 반드시 로그북을 작성하시오.

로그북에 들어가야 반드시 들어가야 하는 항목은 다음과 같다.

- ① 실험 참여자 이름
- ② 실험 날짜와 시작/종료 시각
- ③ 장비 이상이 있었다면 기록. 해결되었더라도 기록한다.
- ④ 실험 종료 후 자석과 Hall 센서를 둔 위치
- ⑤ 사용한 Hall 센서 새로 받은 센서인지
- ⑥ (정상 전선) 그 외의 정상 전선과 BNC-tee는 걸려 있던 위치에 다시 놓는다.
- ⑦ (자석) 처음에 자석이 놓여 있던 곳에 다시 놓고, 자석을 어디에 두었는지 로그북에 기록한다.
- ⑧ (Hall 센서) 처음에 센서가 놓여 있던 곳에 다시 놓고, 센서를 어디에 두었는지 로그북에 기록한다.
- ⑨ (로그북 작성) 로그북에는 실험 시작/종료 날짜와 시각, 장비 이상 여부, 자석과 Hall 센서를 둔 위치와, 실험 중 Hall 센서가 고장으로 새로 받은 센서인지 기록한다.

### 측정 시 주의 사항

- 높은 gain을 사용할 때 오실로스코프에 높은 전압이 입력되지 않도록 주의하시오. 오실로스코프에 과도한 전압이 입력되면 고장날 수 있다.
- 모든 실험에서 각 데이터 포인트에 대해 서너 번 측정을 반복하여 그 평균과 표준편차를 계산해야 하며, 표준편차는 그래프에 error bar로 표시해야 한다. 단, 실험 세팅을 매번 다시 할 필요는 없고, 값을 서너 번 읽으면 충분하다.
- 입력 신호도 오실로스코프에 따로 넣어서 진폭, 주파수 등을 계산하시오. Function generator의 설정 값을 믿으면 안 된다.

아래에 그려진 모든 회로도는 예시로, 필요하다고 생각하면 제시된 회로도와 다른 회로로 실험을 진행해도 된다. 단, 회로를 바꿔서 실험했다면 바꾼 회로도와 그 목적을 보고서에 기재하시오.

### TASK A: Lock-in Amplifier의 구성요소 실습 및 Calibration

본 단계에선 lock-in detection에 사용하는 모든 장비의 정확한 동작 특성을 파악한다. 현실의 전자장비는 완벽하지 않기 때문에 다이얼로 맞춘 값과 실제 값이 달라진다. 따라서 이를 정확하게 파악한 후 본격적인 lock-in detection을 수행한다.

#### A-1 Preamp gain의 주파수 의존성 확인

- ① Preamp에서 설정할 수 있는 20 이하의 모든 gain에 대해, 입력 신호의 frequency에 따른 gain의 변화를 그래프로 그리시오.

- 각 gain에 대한 실험은 서너 번씩 측정하여 그 평균과 표준편차를 계산하시오.
  - 그래프를 그릴 때, 각 계산값의 표준편차를 error bar로 나타내시오.
- ② 얻은 (실제 gain) – (frequency) 관계에서, 실제 gain이 낮은 frequency에서의 50% 이하가 되는 frequency인 “3dB frequency”를 적절한 선형 피팅으로 구하시오.
- 선형 피팅을 할 때 계산했던 표준편차를 반드시 계산에 포함하시오.

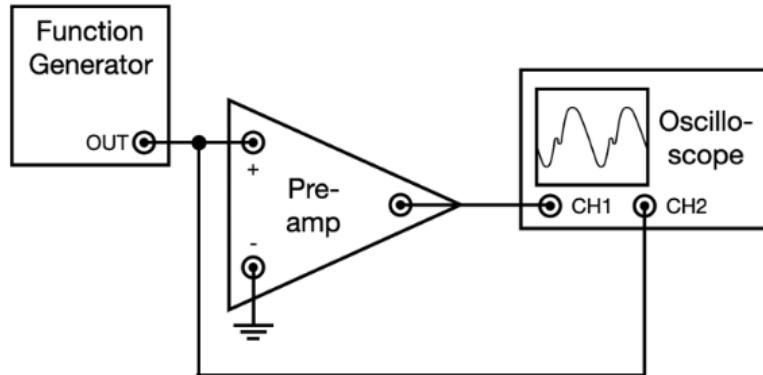


그림 18 Preamp 이득의 주파수 의존성 실험의 예시 회로도

Preamplifier는 입력된 신호의 세기를 증폭시키는 앰프로, lock-in detection에서 입력 신호의 정밀한 분석을 위해 그 세기를 증폭시키는 역할을 한다. 본 실험에서 사용하는 preamplifier는 다이얼을 돌려 원하는 gain을 설정해줄 수 있다. 하지만, 현실의 preamp는 모든 주파수 영역에서 이상적으로 작동하지 않는다. 따라서 실험에 앞서 주파수에 따라 preamplifier가 실제로 출력하는 신호의 gain이 어떻게 변화하는지 파악할 필요가 있다.

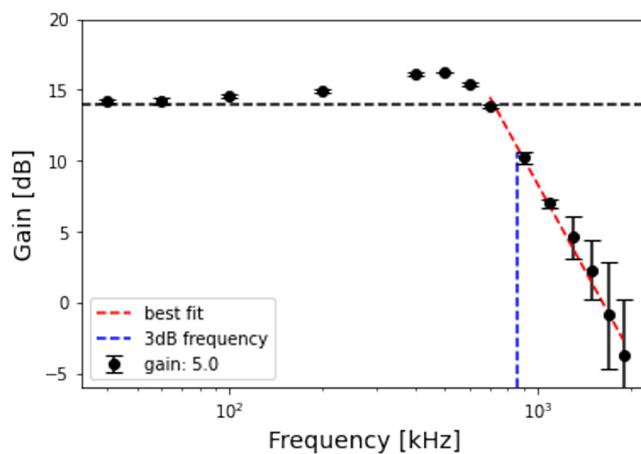


그림 19 Preamplifier gain의 frequency dependency. 2023년 수강생 김성민 제공.

본 실험에서 사용하는 preamp의 경우, 일반적인 frequency에서는 설정한 gain과 실제 gain이 어느정도 일치하나, 일정 frequency를 넘어가게 되면 그림 18과 같이 gain이 줄어들게 된다. 그림 18과 같은 그래프를 직접 실험을 통해 그려보고 gain의 3dB frequency를 계산하시오.

## A-2 Phase shifter의 거동

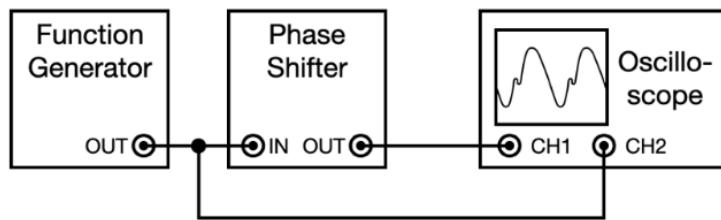


그림 20 Phase shifter의 거동 실험의 예시 회로도

① 한 가지 phase shift 설정값을 정해, 해당 설정에서 입력 신호의 주파수에 따른  $\Delta$ 의 거동을 측정하시오.

- $\Delta$ 는 phase shifter의 설정값 대비 실제 이뤄진 phase shift의 차이이다.
- Phase shift 설정값을 정할 때 미세 조정 나사의 위치가 0이 아닌 것으로 한다.
- 측정하는 주파수 영역은 그림 20과 같이 직선 영역에서 벗어나는 지점의 주파수 영역을 포함해야 한다.

② 선형 영역의 주파수에서 phase shift 설정값에 따른  $\Delta$ 를 측정하시오.

- 선형 영역은 그림 20과 같은 그래프에서 값이 직선을 벗어나는 영역을 의미한다.
- 최소 8가지의 phase shift 설정에 대해 실험하시오.

Phase shifter는 이름 그대로 입력된 신호에 위상차를 주어 출력하는 장비이다. Phase shifter 역시 주파수에 따라 설정한 shift와 실제 shift 사이에 차이가 생기게 된다. 그림 20과 같이  $\Delta$  – frequency 그래프를 그려보면 처음에는  $\Delta$ 가 직선 형태로 감소하다가 개형이 변하는 지점이 있는 것을 확인할 수 있다. 그림 20과 같은 그래프를 실험을 통해 직접 그려보고, 추가로 phase shift 설정값에 따른  $\Delta$ 의 그래프를 그리시오.

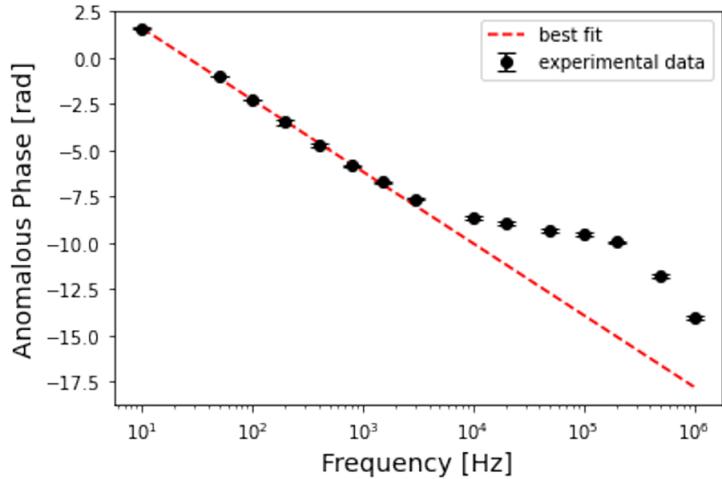


그림 21 Phaser shifter에서 발생하는 anomalous phase ( $\Delta$ ). 2023년 수강생 김성민 제공.

### A-3 Lock-in detector의 DBM 실험

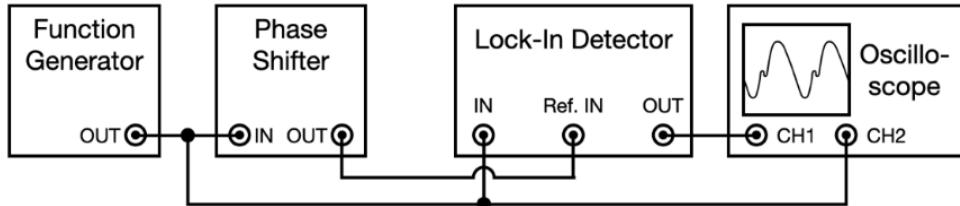


그림 22 DBM 실험의 예시 회로도. 전선이 둘로 나뉘는 부분에 BNC tee를 사용한다.

- ① Lock-in detector의 input signal과 reference signal의 위상차가  $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 일 때의 출력 신호를 원본 신호와 비교하시오.

- 적절한 주파수를 하나 정해 그래프의 개형만 확인하면 충분하다.
- 두 신호의 위상차는 phase shifter의 설정값이 아닌 실제 입력, 출력 신호의 위상차를 기준으로 한다.

본 실험에선 장비 소개 파트에서 설명한 lock-in detector의 DBM 작동을 확인하는 실험이다. DBM의 작동이 의도한 대로 작동하는지 확인하시오. 두 신호의 위상차를 계산할 때 입력과 출력을 모두 오실로스코프에 연결하여 오실로스코프의 측정 기능을 활용하면 편리하다.

### A-4 Low-pass amplifier의 gain

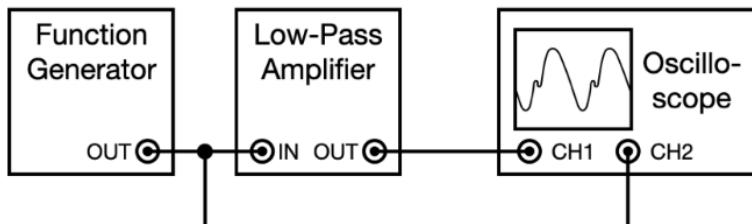


그림 23 Low-pass amplifier의 gain을 측정하는 실험의 예시 회로도

- ① Filter에서 설정 가능한 두 가지 roll-off와 세 가지 time constant의 6가지 조합에 대해, input signal의 주파수에 따른 output signal의 gain을 출력하여 gain - frequency 그래프(gain spectrum)를 그리시오.
- ② Roll-off가 고정되었을 때의 time constant에 따른 gain spectrum 개형의 변화와, time constant가 고정되었을 때의 roll-off에 따른 gain spectrum 개형의 변화를 정성적으로 설명하시오.

Low-pass amplifier(filter)는 입력된 신호에서 낮은 주파수만을 통과시키고 높은 주파수 신호를 걸러내는 filter이다. 본 실험에서 사용하는 filter는 roll-off와 time constant를 조절하여 구체적인 동작 특성을 조절할 수 있다. Roll-off와 time constant 설정에 따른 filter의 거동을 확인하시오.

## TASK B: Lock-in Detection 실험

Task B에서는 본격적으로 신호에 직접 noise를 섞어 lock-in detection을 실습한다. Lock-in detection을 진행할 때 장비의 설정에 사용할 parameter는 Task A에서 확인한 것을 기반으로 설정하도록 한다.

### B-1 FFT를 통한 Noise + signal 스펙트럼 관찰

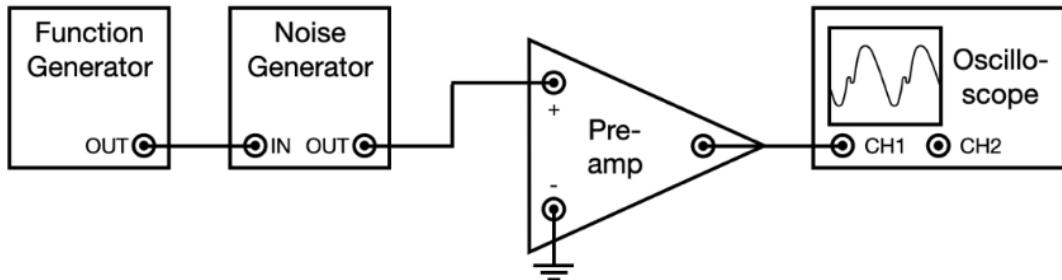


그림 24 FFT를 통한 noise+signal의 스펙트럼을 관찰하는 실험의 예시 회로도

- ① 함수 발생기로 발생한 신호를 noise generator에 통과시킨 후, 오실로스코프의 FFT 기능으로 noise+signal의 스펙트럼을 관찰하시오.
  - 함수 발생기 출력신호의 주파수를 조절하면서 noise generator가 생성하는 noise의 주파수 대역을 확인한다.
  - **Noise generator의 noise를 과도하게 키우지 않도록 한다. 오실로스코프에 무리가 갈 수 있다.** Noise generator가 출력하는 noise는 세기가 매우 강하니 주의가 필요하다.

함수 발생기에서 출력된 신호를 noise generator에 통과시키면 신호에 noise가 섞인다. 이 신호를 preamp에 통과시킨 후, 오실로스코프의 FFT 기능을 이용해 noise+signal의 스펙트럼을 관찰하시오. Noise generator에서 설정할 수 있는 서로 다른 noise의 세기에 따라 스펙트럼을 관찰하고, noise가 없을 때와 비교하시오.

이때, 그림 13에서 보이는 것과 같이 충분히 넓은 영역의 시간 스케일에 대해 FFT를 진행하도록 한다. 그렇게 해서 noise가 상대적으로 약한 주파수 대역을 찾아 Task B-2에서 input signal의 주파수로 사용할 주파수를 정해야 한다.

### B-2 Lock-in detection을 통한 signal의 검출

본 실험에서는 함수 발생기로 발생시킨 신호에 noise를 섞어서, 함수 발생기의 신호를 lock-in detection으로 다시 검출하는 실습을 진행한다.

① 그림 25와 같은 회로를 구성하고, function generator에서 교류 신호를 흘려준다.

- Function generator의 주파수는 Task B-1에서 확인한 noise의 주파수 대역과 최대한 겹치지 않는 주파수로 설정한다.
- Preampl의 DC/AC 스위치는 AC로 둔다.

② Lock-in detector의 input signal과 reference signal의 위상차를 phase shifter로 조절하면서, 두 신호의 위상차에 따른 lock-in detector의 출력 세기를 측정한다.

③ Function generator와 noise generator의 설정을 바꿔가면서 다양한 signal to noise ratio(SNR)에 대해 lock-in detection이 제대로 수행되는지 확인한다.

- Function generator 신호의 진폭과 lock-in detector 출력의 세기를 비교하시오.
- Input과 reference의 위상차는 lock-in detector의 출력이 가장 커질 때로 하면 된다.
- Noise generator의 출력 세기를 올릴 때 오실로스코프에 과전압이 걸리지 않도록 한다.

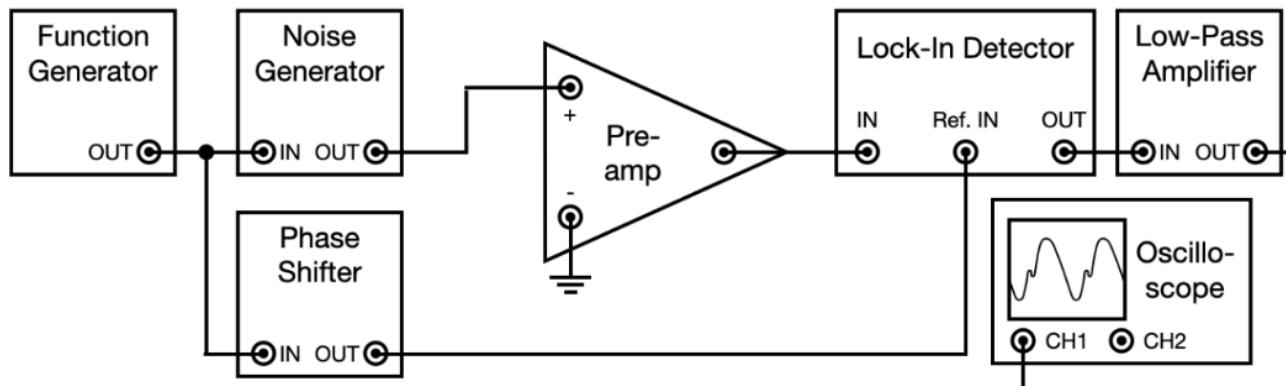


그림 25 Lock-in detection을 통해 signal을 검출하는 실험의 예시 회로도

그림 25와 같이, function generator로 신호를 생성하고 noise를 섞은 후, 섞은 noise를 다시 걸러내는 lock-in detection을 수행하시오. 회로를 구성하는 요소의 설정 값은 Task A와 Task B-1의 결과를 토대로 설정해야 한다.

실험 진행 시 주의할 점은, 다른 실험과 마찬가지로 function generator이나 phase shifter의 출력을 확인해야 할 때 반드시 분석하고자 하는 입력 신호도 오실로스코프에 연결하여 분석해야 한다는 것이다. 절대로 실험 장비의 설정 값을 믿으면 안 된다.

### B-3 Lock-in detection의 DC offset stability

Task B-2에서는 noise에 DC offset이 없다. 즉, noise가 한쪽으로 치우쳐 있지 않는다. 하지만 실제 lock-in detection은 DC offset이 있는 noise도 잘 걸러낸다. 본 실험에서는 이 사실을 확인할 것이다.

① 그림 25와 같이 회로를 구성하되, DC offset이 있는 noise를 섞도록 한다.

- Function generator의 output A에서 DC offset이 있는 신호를 출력하고, 이를 둘로 나눠 noise generator와 preamp에 입력한다.
- Noise generator의 출력은 lock-in detector의 input signal로 사용한다.
- Preamp는 AC mode로 두고, 그 출력을 phase shifter에 입력하고 그 출력을 lock-in detector의 reference signal로 사용한다.

② 5가지 다른 offset에 대해, function generator 출력의 진폭 대비 lock-in detector의 출력 세기를 비교한다.

- 마찬가지로 input과 reference의 위상차는 output이 최대가 되는 값으로 한다.
- 특별한 이유가 없다면 입력 주파수는 Task B-2에서와 같게 한다.

## TASK C: Lock-in Detection을 통한 자석의 Magnetic Field 및 Dipole Moment 측정

이제 lock-in detection을 이용해 실제 물리적 현상에 대한 측정을 진행한다. 본 실험에서는 주어진 홀 소자를 활용해 자석이 만드는 자기장을 측정할 것이다. 홀 전압은 그 세기가 매우 작기 때문에 lock-in detection과 같은 장치 없이는 측정이 불가능하므로, lock-in detection을 직접 해보면서 자기장을 측정할 것이다.

① 그림 26와 같은 회로를 구성하고, function generator에서 교류 신호를 흘려준다.

- Function generator의 주파수는 외부 noise의 주파수 대역에 포함되지 않는 값으로 한다. 이것으로는 자연 noise의 주파수 대역을 FFT로 분석하거나, 60 Hz 등과 같은 noise source가 가질 만한 자연적인 주파수를 생각하는 등의 방법이 가능하다.
- Hall mount가 없으면 hall element의 다리에 전선을 직접 연결해 사용해도 무방하다.
- 그 외의 실험 장비의 설정 값은 Task B의 결과를 참고하여 홀 효과를 가장 잘 측정할 수 있을 값으로 설정한다.

- ② 준비된 자석의 거리에 따른 자기장의 세기를, Hall element를 이동해가면서 측정한다.
- 자석의 극 방향으로 거리에 따른 자기장의 세기를 측정해본다.
  - 다음으로 자석의 극 방향에 수직인 방향으로 거리에 따른 자기장의 세기를 측정한다.
  - 거리에 따른 자기장의 변화를 그래프로 그리고 확인해본다. 자석을 작은 단일 dipole로 근사했을 때의 자기장 분포와 대략 형태가 맞는지 확인해본다.

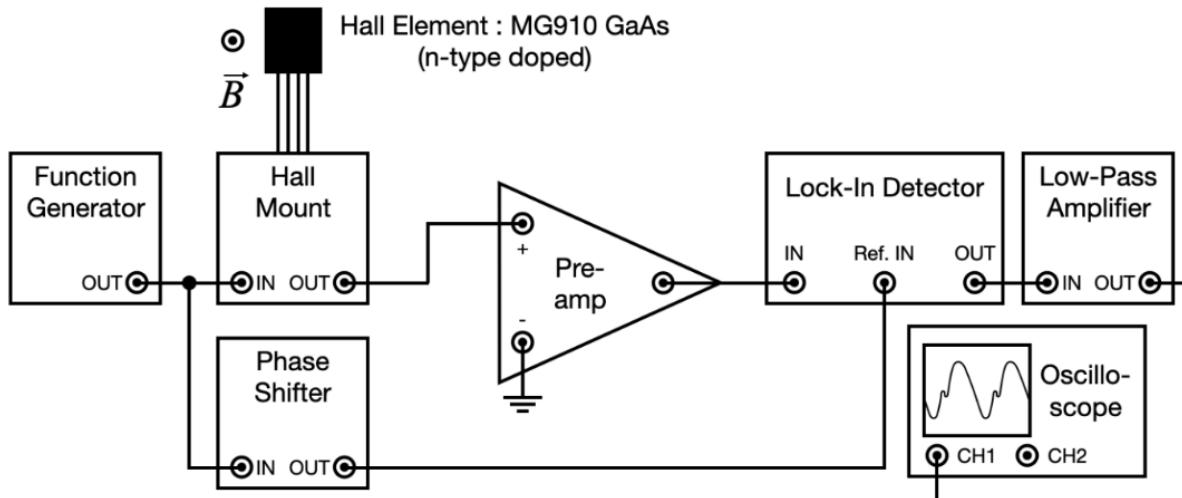


그림 26 훌 소자와 lock-in detection을 활용한 자기장 측정의 예시 회로도

## Troubleshooting

실험 중간에 문제가 생겼을 때 조교에게 문의해보기 전 가장 먼저 해봐야 하는 것들의 목록이다.

- 실험 초기에 오실로스코프에 아무 신호도 잡히지 않는다면 lock-in amplifier kit의 전원을 켰는지 확인하시오. 실험 kit도 전원을 켜야 작동한다.
- 화면에 신호가 위아래로 진동하는 평탄한 선으로 잡힌다면 스케일 다이얼을 돌려 가로축을 축소하시오.
- 오실로스코프에 표시되는 값이 정상적인 값의 특정 배율로 나타난다면 해당 채널의 프로브 설정을 확인하시오. 이에 대한 자세한 설명은 오실로스코프 매뉴얼 172페이지에서 '프로브 설정' 키워드를 찾아 확인할 수 있다.
- 실험 결과가 이상하게 나올 경우, 가장 먼저 고장난 전선이 있는지 확인하시오. 거의 모든 실험에서 반드시 한 번은 발생하는 경우이면서, 문제점 파악에 시간이 매우 많이 낭비되는 유형이다. 실험 결과가 이상하다면 다른 문제점을 의심해보기 전에 사용하고 있는 전선이 모두 정상적으로 작동하는지 가장 먼저 확인하는 것이 좋다.

사용하고 있던 모든 전선을 분리한 후, 각 전선으로 function generator와 오실로스코프를 연결하여 function generator의 출력이 올바르게 전달되는지 하나씩 확인해보면 된다.

### 장비 체크리스트: 매일 실험 종료 후 확인하고, 로그북에 기재한다.

\*사용 중 문제가 발생했거나 장치 사용 전 문제를 발견하면 즉시 담당 조교에게 보고한다.

- ① (자석) 처음에 자석이 놓여 있던 곳에 다시 놓고, 자석을 어디에 두었는지 로그북에 기록한다.
- ② (Hall 센서) 처음에 센서가 놓여 있던 곳에 다시 놓고, 센서를 어디에 두었는지 로그북에 기록한다.
- ③ (오실로스코프) 꽂혀 있던 모든 전선을 빼고 전원을 끈다.
- ④ (함수 발생기) 꽂혀 있던 모든 전선을 빼고 전원을 끈다.
- ⑤ (Lock-in Kit) 꽂혀 있던 모든 전선을 빼고 후면의 스위치로 전원을 끈다.
- ⑥ (고장난 전선) 고장난 것으로 확인된 전선이 있으면 따로 모아두고 담당 조교에게 놓은 위치를 보고한다.
- ⑦ (정상 전선) 그 외의 정상 전선과 BNC-tee는 걸려 있던 위치에 다시 놓는다.
- ⑧ (로그북 작성) 전술한 항목을 로그북에 작성한다. 특히 날짜, 자석과 Hall 센서를 둔 위치와, 사용한 센서가 새로 받은 센서인지는 반드시 기록한다.

## 참고 문헌

K. Sol, *Intermediate physics experiment – Lock-in detection and Hall effect Manual* (2022).

H. Lee, *Intermediate physics experiment – Lock-in detection and Hall effect Report* (2020).

Teachspin, *Lock-in Amplifier Kit Manual*, <https://www.teachspin.com/signal-processor-lock-in>.

SciTechDaily, *1,400,000 Times Stronger Than Earth's: New Record for Strongest Steady Magnetic Field*, <https://scitedaily.com/1400000-times-stronger-than-earths-new-record-for-strongest-steady-magnetic-field/>.

*MG910 Linear GaAs Hall Sensor Datasheet*,  
<https://www.devicemart.co.kr/goods/view?no=10918258>.

J. Lesurf, *Double Balanced Mixer & The Phase Lock Loop*, [https://www.st-andrews.ac.uk/~www\\_pa/Scots\\_Guide/RadCom/part13/page1.html](https://www.st-andrews.ac.uk/~www_pa/Scots_Guide/RadCom/part13/page1.html).

B. Schweber, *An overview of filters and their parameters, Part 4: Time and phase issues*,  
<https://www.analogictips.com/an-overview-of-filters-and-their-parameters-part-4-time-and-phase-issues/>.