

21cm 중성수소 스펙트럼 관측용 전파망원경 제작

서울대학교 물리천문학부 대학원생들과 같이 만들었습니다.
2024.-2026.

순서

- 피라미드혼 안테나 제작
- 도파관 제작
- 수신기 제작
- 프로그램 설치
- 관측
- 관측 자료처리

피라미드혼 안테나 제작

재료

- 폼보드(900mmx1200mm)
- 알루미늄 호일
- 알루미늄 테이프
- 양면 테이프
- 안전자와 커터
- 기타 문방구



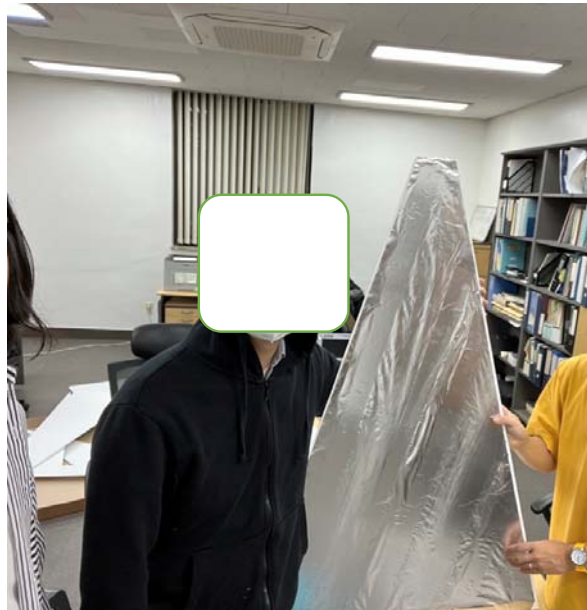
피라미드혼 안테나 제작

- 안테나는 전파를 모으는 역할을 합니다.
- 개구부가 클수록 해상도가 좋아집니다.

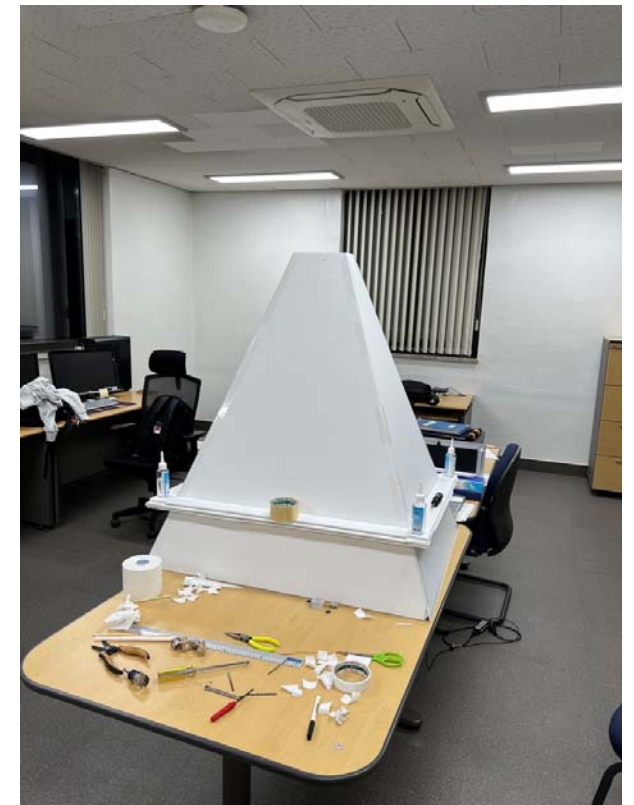
- 피라미드 혼 결합
(보강 고리는 자유)



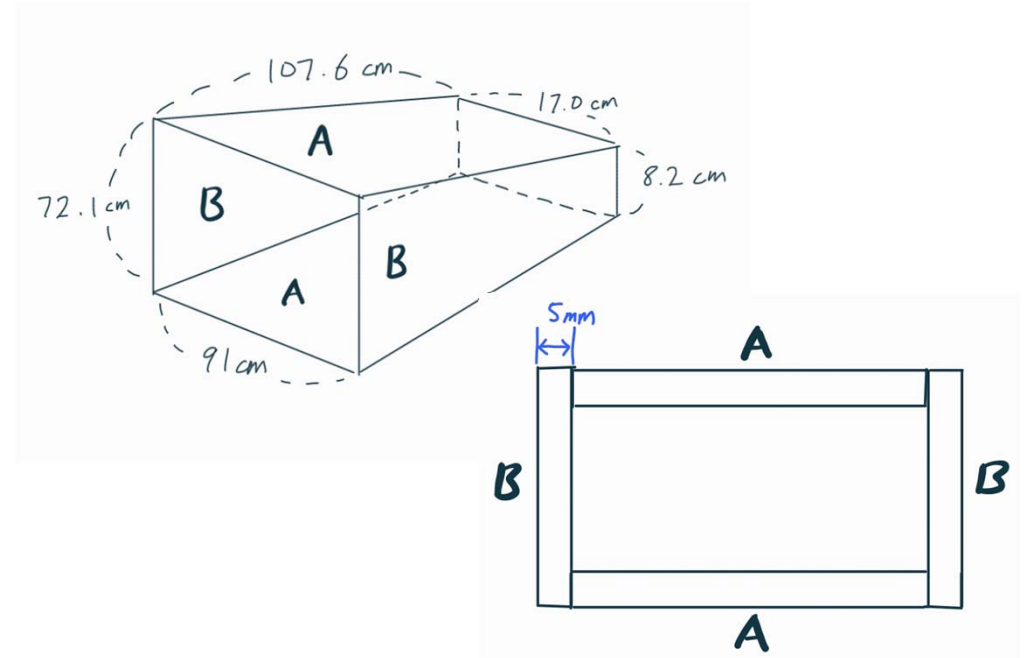
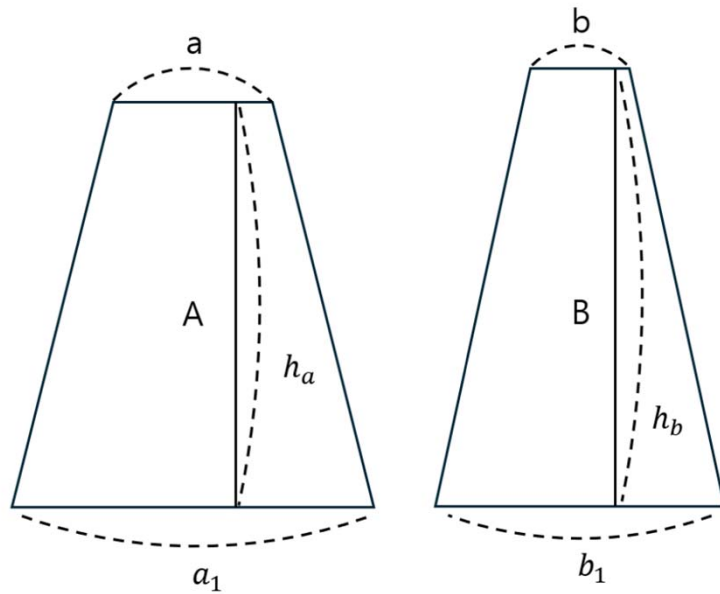
폼보드 재단



알루미늄 호일 부착



혼안테나 치수



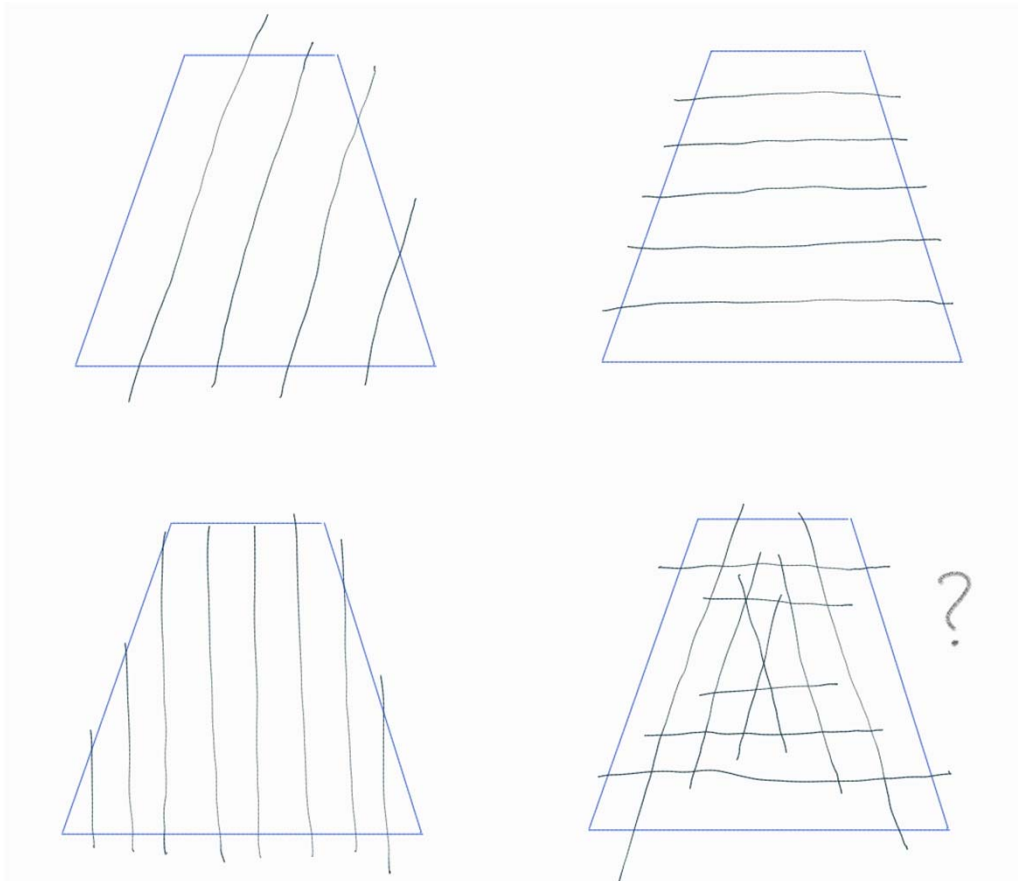
단위: cm	밑면 (a_1, b_1)	윗면 (a, b)	높이 (h_a, h_b)
A	91.0	17.0	109.1
B	72.1 + 1.0	8.2 + 1.0	110.4

- A, B 형 폼보드 각각의 한쪽 면에 알루미늄 호일 도배
- 피라미드 높이 104 cm
- 폼보드 두께 5mm 고려
 - A판 옆면에 B판 접착

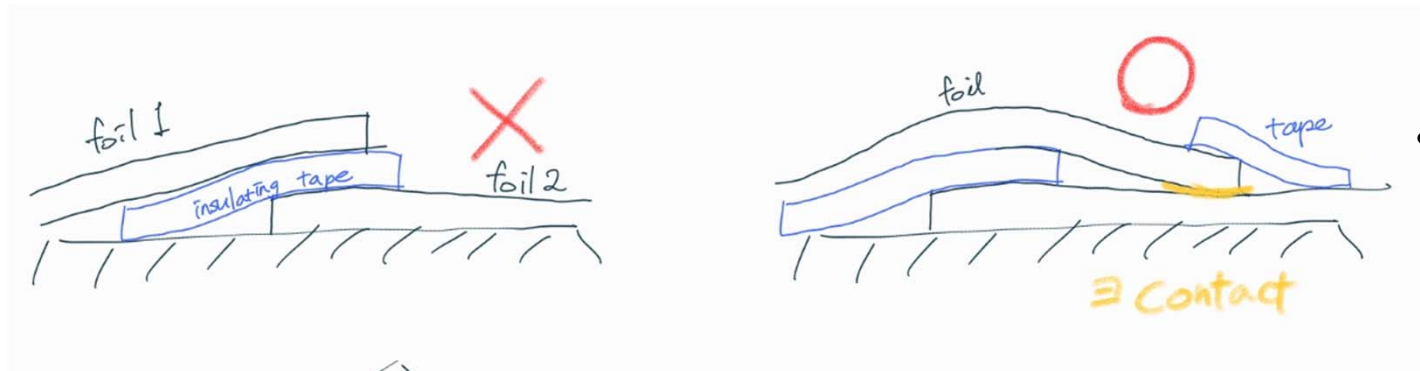
혼안테나 설계 원리

- 설계 원리에 대해서는 아래 논문을 참고하세요.
- 박종애 등, "21CM 우주전파 수신용 안테나의 제작", 천문학논총, 1993, 8, 1

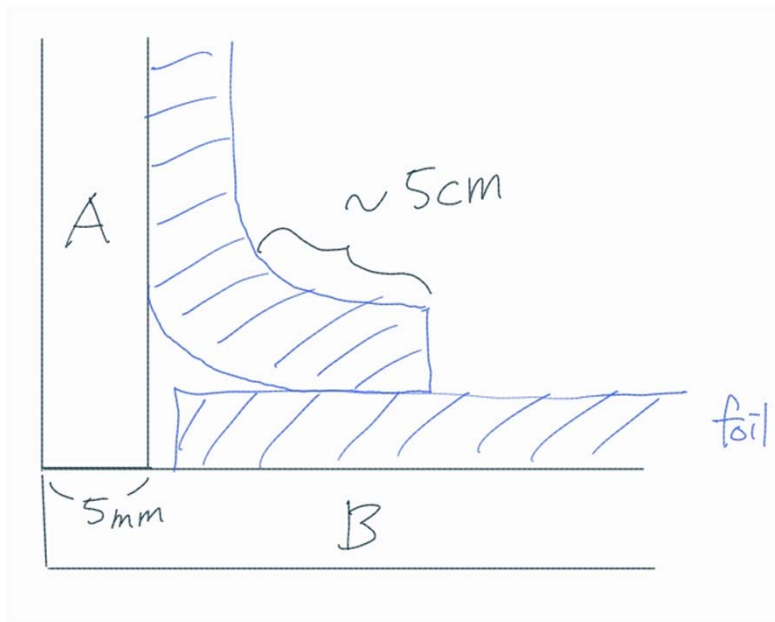
호일 부착



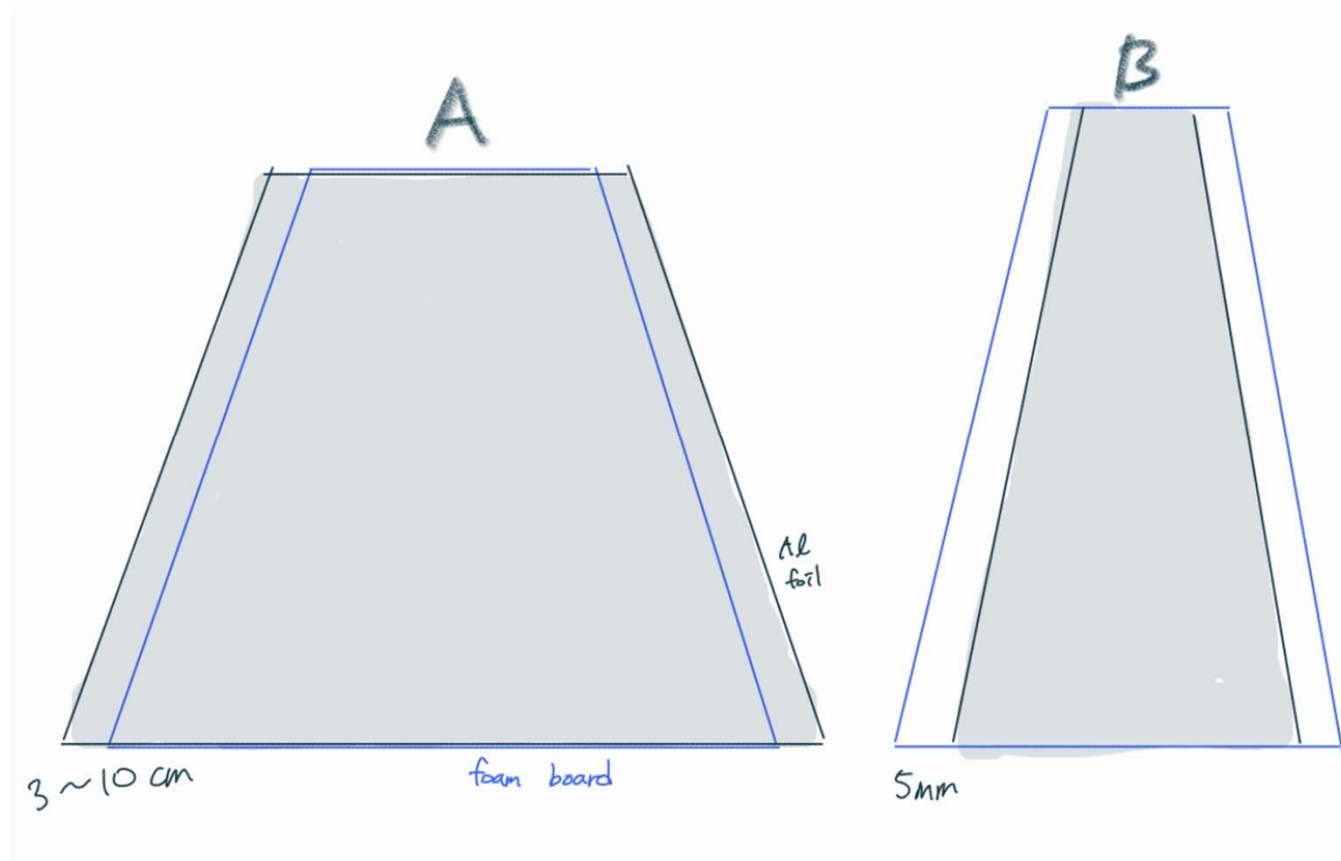
- 알루미늄의 Skin depth: 2.2 μm .
($\ll$ 호일 두께 18 μm)
- 주의: 호일끼리 전기적 접촉 유지
- 표면의 주름은 중요하지 않다
($\Delta x \ll \lambda \sim 21\text{cm}$)
- 테이프를 잘게 잘라 부분적으로만 고정해도 된다



- 모든 지점이 단일한 금속 표면으로 연결되어야 한다



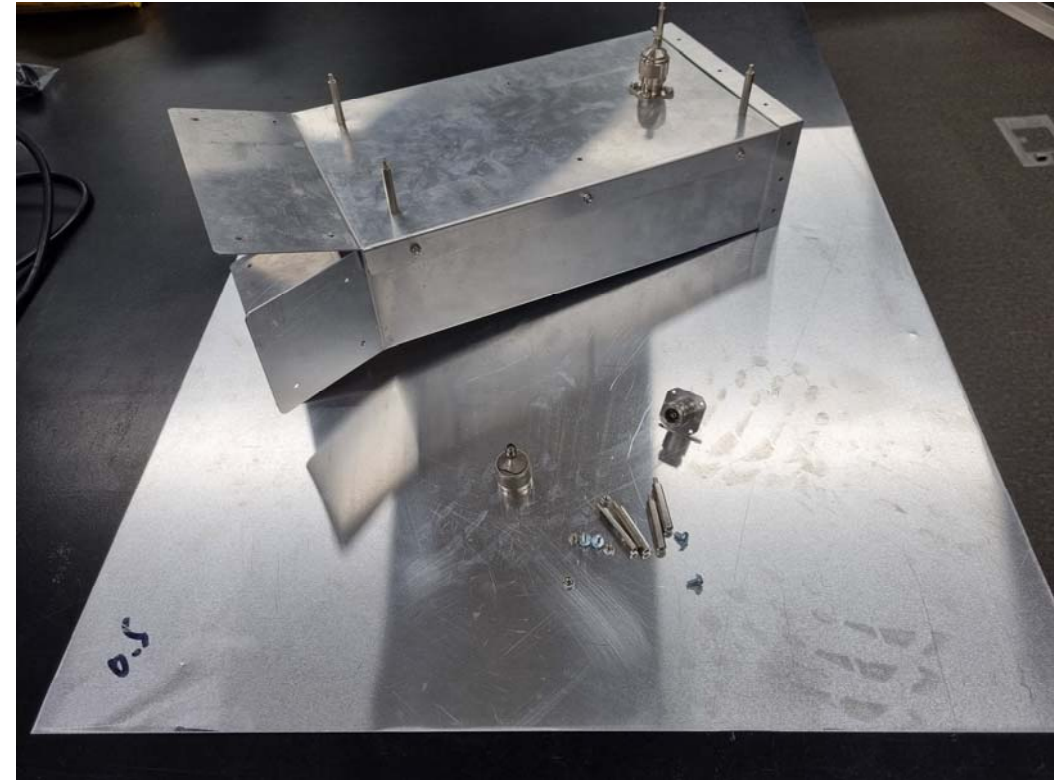
- 가장자리에 여유 남기기 (~ 5 cm)



도파관 제작

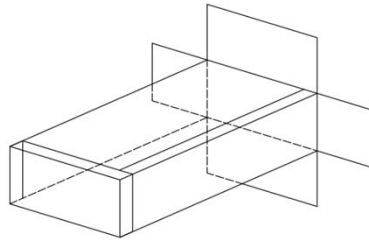
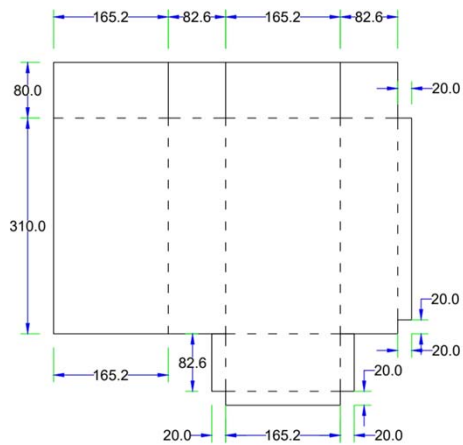
재료

- 두께 0.3-0.4mm인 알루미늄 판
- 4구멍 플랜지 타입 N형 커넥터 (암)
- SMA(암)-N형(숫) 변환 어댑터
- 직경 1-2mm, 길이 5.5mm의 구리선이나 철선
- M3 볼트, 너트
- M3 지지대



도파관 제작

재질 : 알루미늄
단위 mm
두께 1.0 mm 3ea



- 왼쪽의 도면을 참고해서 두께 0.3-0.4m의 알루미늄 판으로 도파관을 만듭니다. 구멍도 뚫어 놓습니다.
- 날개를 혼의 각도에 맞추어 구부립니다. (~20도)
- 도파관 아랫판과 윗판을 볼트와 너트로 고정합니다.
- 왼쪽 사진은 외부 제작 업체에 의뢰해서 만든 것입니다. 두께 1mm로 했습니다.

- 볼트/너트로 도파관 조립

도파관 설계 원리 & 프로브 위치와 길이

- 도파관은 cutoff frequency를 가진다

$$f_c = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}}$$

- 기본 모드($m = 1, n = 0$)에서 $f_c = \frac{c}{2a}$, $\lambda_c = 2a$.
- 도파관은 $\sim 1.6 f_c$ 에서 최적의 전파 효율을 보인다.
- 21 cm의 중성수소선을 보기 위한 도파관의 가로 길이 17 cm.
- 관내파장 = $\frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2}} = 27.6 \text{ cm}$
- 도파관 뒷판으로부터 $\frac{\lambda}{4}$ 위치에 프로브 설치 (정상파 조건: 도체에 대해 전자기파는 고정단반사)

- 아래 그림을 참고해서 N형 커넥터에 5 cm 길이의 금속선(프로브)을 납땜하고 도파관에 결합합니다.

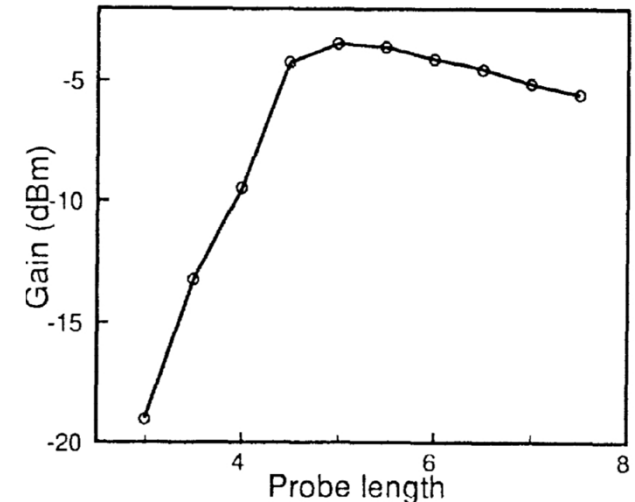


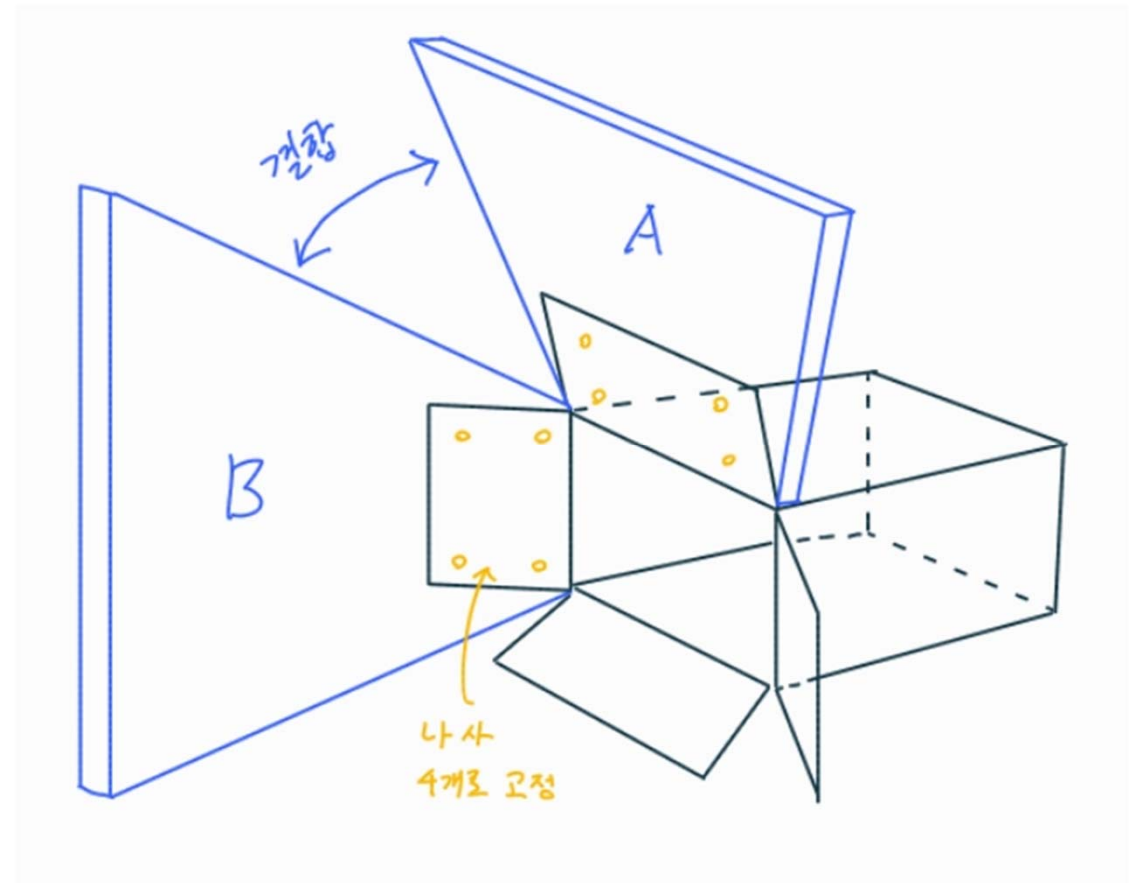
그림 4. The measured gain as a function of probe length.

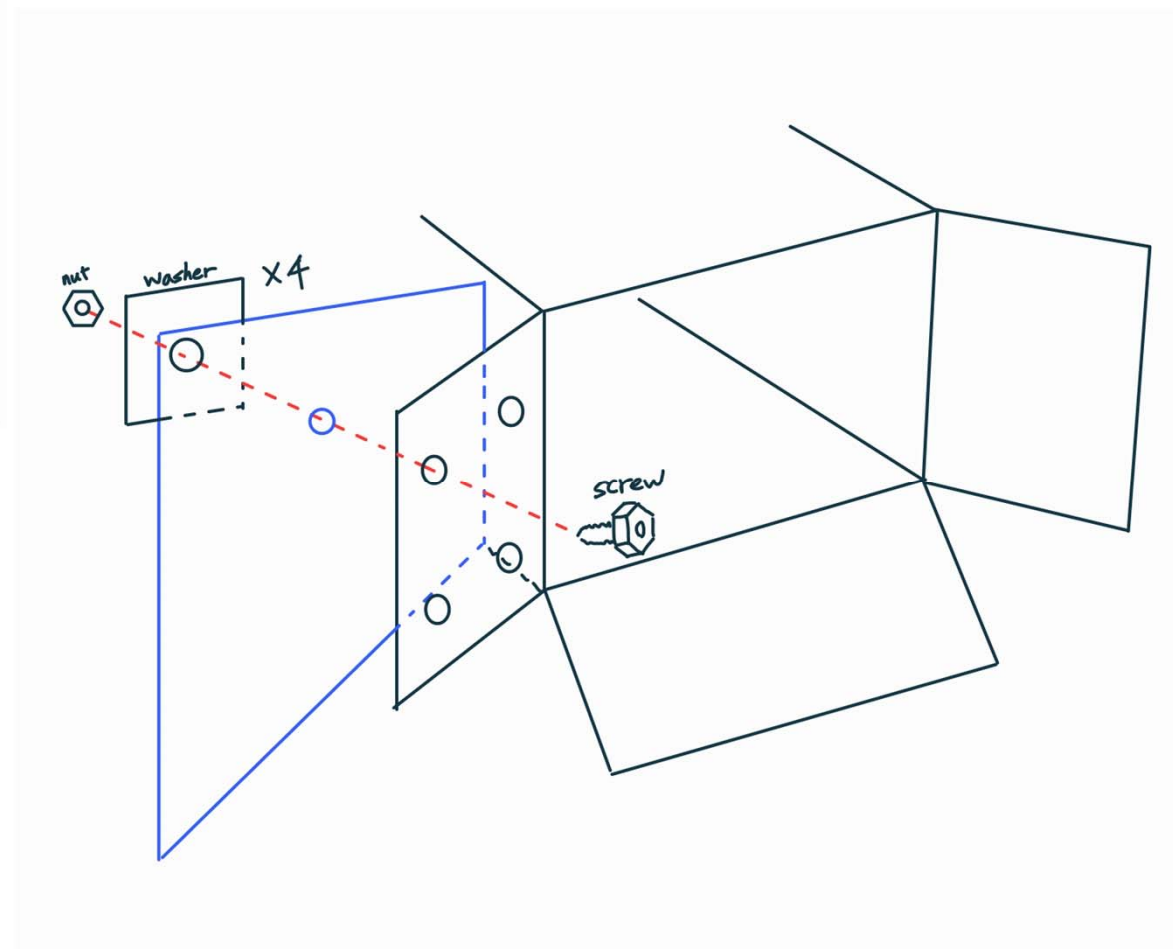
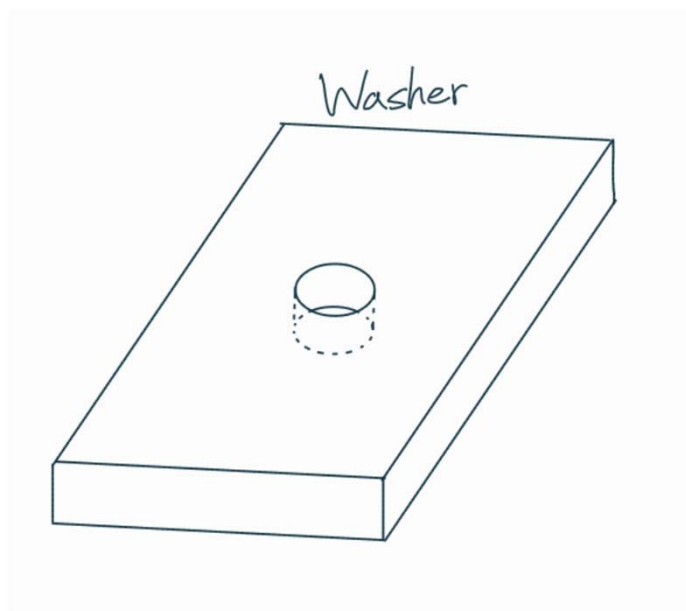
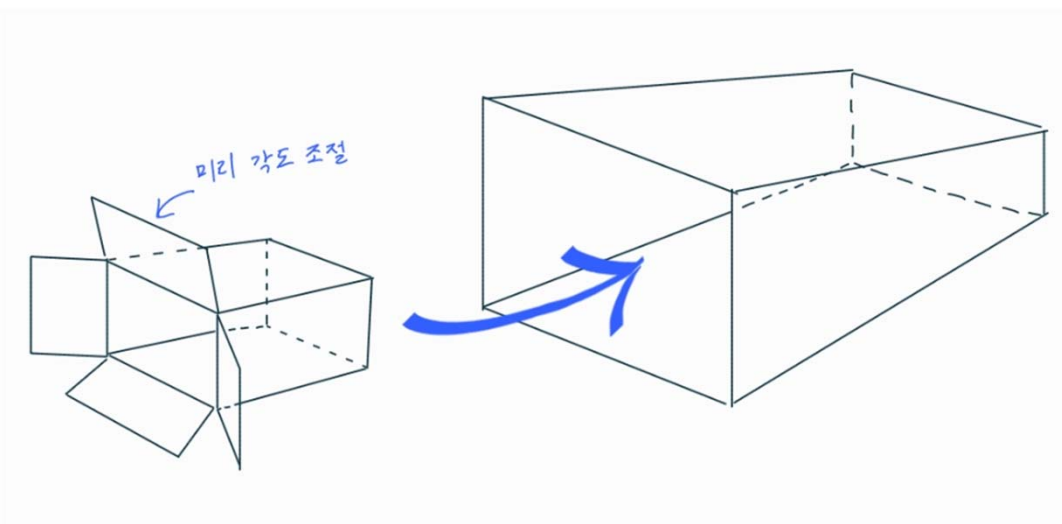
완성된 도파관



피라미드혼과 도파관 결합

- 알루미늄 호일과 도파관이 전기적 접촉을 유지하도록 결합
(도파관 날개를 호일 위로)
- 혼-도파관 결합에는 너트와 볼트 사용 (볼트로 폼보드를 관통하여 반대편에서 볼트 체결)
- 혼 A-B판 접착에는 글루건, 테이프 등 활용





수신기 제작

재료와 부품

- 앰프
 - 매우 약한 우주전파 신호를 10^5 배 증폭시켜준다.
 - <https://nooelec.com>의 SAWbird+H1 추천
- SDR (software defined radio)
 - 증폭된 아날로그 신호를 디지털 신호로 바꾸어 준다.
 - <https://rtl-sdr.com>의 RTL-SDR BLOG V4 추천
- 알루미늄 판 165mmx310mm
- Semi-rigid cable
- 5V micro-usb 전원 어댑터
- USB-A 케이블
 - 길이 3m 이내
- 플라스틱 지지대

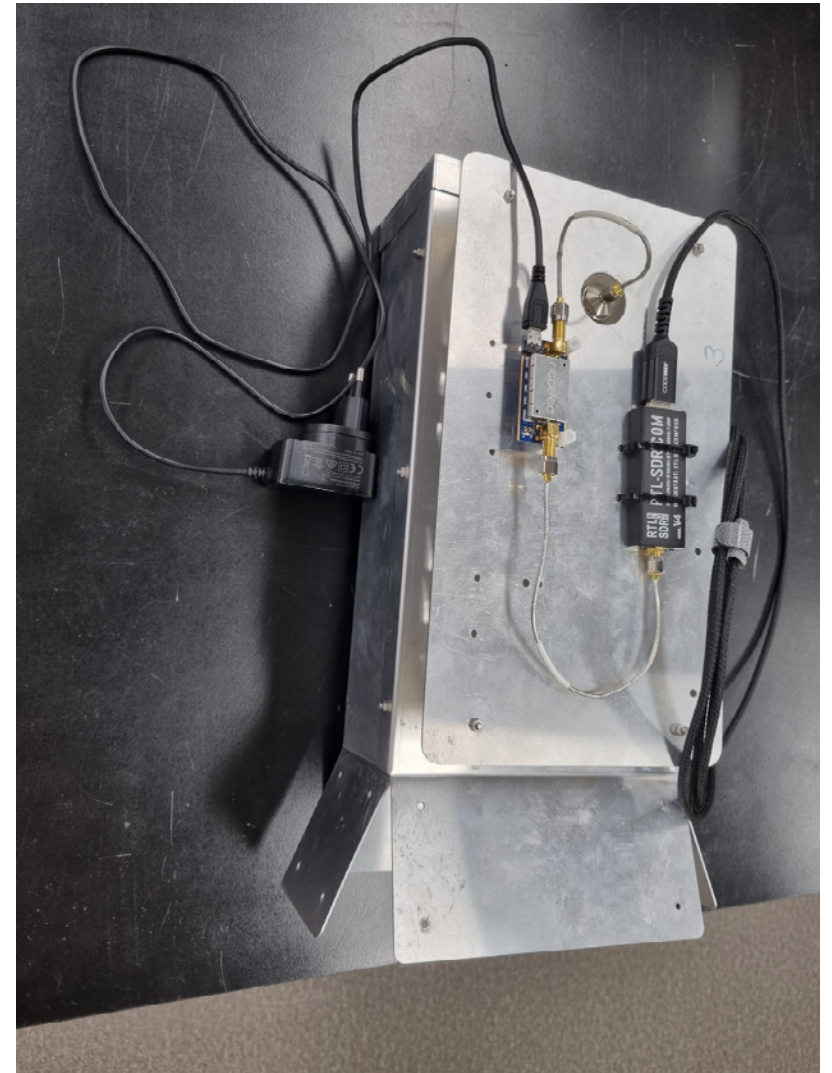


수신기 동작원리

- 도파관 프로브에서 전자기 파동이 전류신호로 바뀐다.
- 수신기는 신호를 증폭하고, SDR (software defined radio)을 이 용해서 디지털 신호로 변환한다.
- 디지털 신호는 노트북으로 받아 스펙트럼을 구한다.
- 이 과정에서 잡음이 들어온다. → 적절히 신호처리를 해주어야 한다.
- 소자들이 매우 예민하다. 소자들을 만지는 경우에는 정전기 방지 손목밴드를 착용한다.

수신기 조립

- 왼쪽 그림과 같이 알루미늄 판에 소자들을 고정시킨다.
- Semi-rigid cable을 이용해서 도파관에서 나오는 SMA-N 변환 어댑터와 앰프, 그리고 앰프와 SDR을 연결한다.
- USB 케이블을 이용해서 SDR과 노트북을 연결한다.



전체 시스템 결합

- 피라미드혼과 도파관을 결합한다.
- 수신기판을 결합하고 앰프에 전원을 넣어 본다.
- 전류를 모니터할 수 있다면 전류가 120-130mA 흐르는 것을 확인한다.
- 정전기에 유의한다. 정전기 방지 손목밴드를 항상 착용한다.



프로그램 설치

pyrtlsdr 설치

- RTL-SDR을 파이썬을 통해 사용하기 위해서 pyrtlsdr 패키지를 설치한다.
 - RTL-SDR의 조작
 - 입력 신호를 기록
- 노트북 윈도우에서 명령어창을 열고
 - Prompt> pip install pyrtlsdr[lib] 입력 후 엔터
 - 마지막 줄에 "Successfully installed pyrtlsdr-0.3.0 pyrtlsdrlib-0.0.3" 이 뜨면 정상적으로 설치 완료(버전은 바뀔 수 있음.)



Anaconda Prompt



```
(base) C:\Users\woody>pip install pyrtlsdr[lib]
Collecting pyrtlsdr[lib]
  Using cached pyrtlsdr-0.3.0-py2.py3-none-any.whl.metadata (8.9 kB)
Collecting pyrtlsdrlib (from pyrtlsdr[lib])
  Using cached pyrtlsdrlib-0.0.3-py3-none-win_amd64.whl.metadata (1.9 kB)
Using cached pyrtlsdr-0.3.0-py2.py3-none-any.whl (26 kB)
Using cached pyrtlsdrlib-0.0.3-py3-none-win_amd64.whl (1.3 MB)
Installing collected packages: pyrtlsdrlib, pyrtlsdr
Successfully installed pyrtlsdr-0.3.0 pyrtlsdrlib-0.0.3
```

```
(base) C:\Users\woody>
```

드라이버 설치

- RTL-SDR을 컴퓨터 USB 포트에서 인식하기 위해서 아래의 드라이버를 설치한다.
 - Airspy SDRSharp
 - zadig

- <https://airspy.com/download/>로 가서 첫번째 것 클릭

The screenshot shows the Airspy website's download page. The browser's address bar displays 'airspy.com/download/'. The website's navigation bar includes links for Products, Purchase, Download, Quick Start, Online SDR, Reviews, and Contact. The main content area is titled 'SDR Software Download' and lists four software packages for download:

- Software Defined Radio Package (Change log)**: This package contains:
 - SDR# (SDRSharp) **revision 1920** (2024-04-25) – The **BEST** free SDR software for Airspy!
 - Airspy SDR drivers
 - AOR IQ drivers (AR5700D, AR2300IQ, AR5001D with IQ5001 option, AR6000 with IQ5001 option)
 - RFSPACE SDR drivers (SDR-IQ, Net-SDR, SDR-IP, CloudSDR)
 - HackRF driver
 - RTL-SDR driver installation script (RTL-SDR Blog Build)The 'Download' button for this package is highlighted with a red box and the Korean text '클릭' (Click) next to it.
- SDR# SDK for Plugin Developers**: This package contains a zero-setup Visual Studio 2022 solution with an empty plugin template. An integrated SDR# instance is configured as to host your plugins and is automatically launched by Visual Studio when debugging. For ample examples, check github. **Pre-requisites: .NET 8 Windows x86 SDK and Visual Studio 2022**
- SDR# Big Book in English 2024**: This is the English version of the SDR# Big Book by Paolo Romani (IZ1MLL).
- SDR# Big Book en Français v5.5**: This is the French translation of the SDR# Big Book by Philippe DIAZ and Michel CHERONT (F1AUX).
- SDR# Big Book in German v5.5**: This is the German translation of the SDR# Big Book by Gerhard Schweizer.

- 압축 풀고 install-rtlsdr.bat 실행

압축 풀기 sdrsharp-x86.zip							
보기 압축 풀더 도구							
C > 다운로드 > sdrsharp-x86.zip							
이름	유형	압축된 크기	암호 사용	크기	비율	수정된 날짜	
Plugins	파일 폴더					2021-02-19 오후 7:52	
airspy.dll	응용 프로그램 확장	61KB	아니요	109KB	45%	2024-04-25 오전 11:30	
airspyhf.dll	응용 프로그램 확장	67KB	아니요	123KB	46%	2024-04-25 오전 11:30	
aor_iq.dll	응용 프로그램 확장	83KB	아니요	157KB	48%	2024-04-25 오전 11:30	
aor_iq_receiver.exe	응용 프로그램	116KB	아니요	212KB	46%	2024-04-25 오전 11:30	
BandPlan.xml	Microsoft Edge HTML Docu...	2KB	아니요	11KB	82%	2022-09-16 오후 8:05	
hackrf.dll	응용 프로그램 확장	49KB	아니요	88KB	45%	2024-04-25 오전 11:30	
httpget.exe	응용 프로그램	84KB	아니요	188KB	56%	2021-01-27 오후 6:46	
install-rtlsdr.bat	Windows 배치 파일	1KB	아니요	1KB	42%	2023-08-17 오후 4:56	
libusb-1.0.dll	응용 프로그램 확장	55KB	아니요	105KB	48%	2024-04-25 오전 11:30	
msvcr100.dll	응용 프로그램 확장	400KB	아니요	760KB	48%	2024-04-25 오전 11:30	
msvcr120.dll	응용 프로그램 확장	494KB	아니요	943KB	48%	2024-04-25 오전 11:30	
PortAudio.dll	응용 프로그램 확장	43KB	아니요	90KB	53%	2024-04-25 오전 11:30	
pthreadVCE2.dll	응용 프로그램 확장	27KB	아니요	71KB	63%	2024-04-25 오전 11:30	
sdriq.dll	응용 프로그램 확장	15KB	아니요	24KB	38%	2024-04-25 오전 11:30	
SDRSharp.config	Configuration 원본 파일	2KB	아니요	5KB	75%	2024-03-19 오후 4:22	
SDRSharp.exe	응용 프로그램	967KB	아니요	2,105KB	55%	2024-04-25 오전 11:30	
shark.dll	응용 프로그램 확장	111KB	아니요	202KB	46%	2024-04-25 오전 11:30	
unzip.exe	응용 프로그램	75KB	아니요	164KB	55%	2021-01-27 오후 6:46	
zip.exe	응용 프로그램	71KB	아니요	132KB	47%	2021-01-27 오후 6:46	

- <https://zadig.akeo.ie/>로 가서

The screenshot displays the Zadig website in a web browser. The main header features the Zadig logo and the tagline "USB driver installation made easy". Below this, a screenshot of the Zadig application interface is shown, highlighting the "Device" tab with a selected device (WinUSB) and a "Reinstall WCID Driver" button. The website also includes a sidebar on the left with a "Download our Energy report" link and a "Download" button. On the right, there is a "Download" button for the "Energy Transition Outlook 2023 - detailed analysis report of the energy future". The main content area contains a "Download" button and a section for the latest version, "Zadig 2.9 (5 MB)", which is highlighted with a red box and the Korean word "클릭" (click). The footer mentions "System Requirements: Windows 7 or later. Windows XP and Windows Vista are NO LONGER SUPPORTED."

Download our Energy report

Energy Transition Outlook 2023 - detailed analysis report of the energy future

Download >

Download

Updated 2024.06.13:

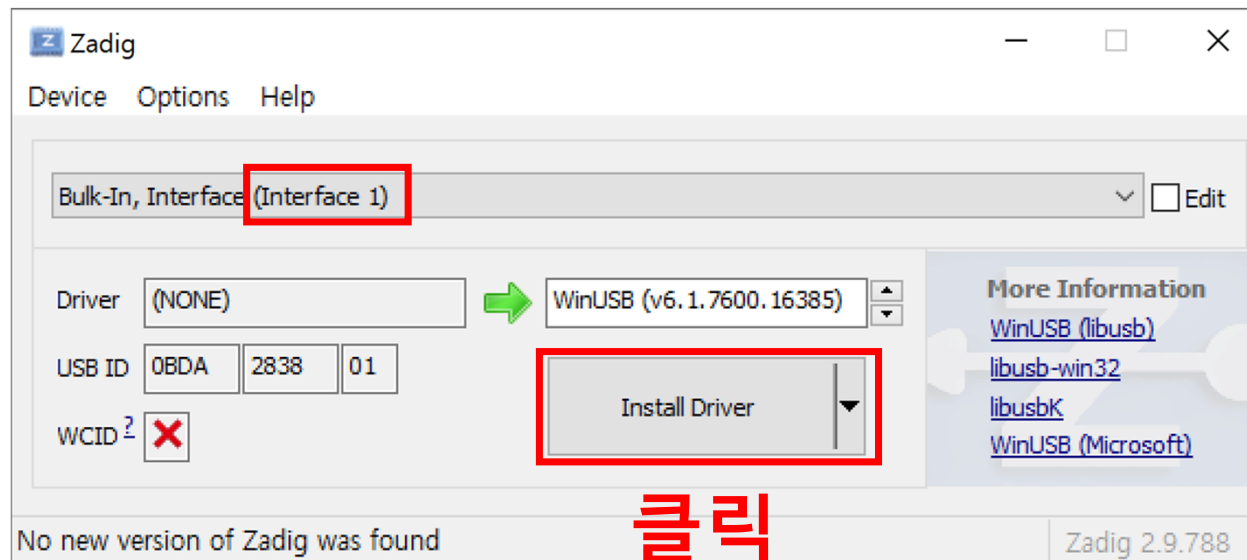
Zadig 2.9 (5 MB) **클릭**

System Requirements:

Windows 7 or later.
Windows XP and Windows Vista are NO LONGER SUPPORTED.

- 다운로드 받은 파일 zadig-2.9.exe을 실행
- RTL-SDR을 컴퓨터 USB 포트에 연결하고
 - Options, list all device 순으로 클릭한 후 'Bulk-In Interface (Interface 0)'을 선택
- 이것으로 프로그램 설치 완료!

아래 예는 드라이버가 이미 설치되어 Interface 1이 보임



관측

하드웨어 셋팅



- 사방이 트인 곳으로 전파망원경, 노트북, 전원 연장 케이블, 망원경 받침대, 테이블들을 옮겨 놓는다.
- 정전기 방지 손목 밴드를 차고 전원을 연결한다.
- 5V를 공급하고, (전류측정이 가능하다면) 정격전류 120-130 mA가 흐르는지 확인한다.

관측 프로그램 작성

- 메모장이나 워드패드를 이용해서 오른쪽과 뒷장의 슬라이드에 있는 프로그램을 입력한다.
- 프로그램의 대략적인 내용
 - 1-14 줄 : SDR 초기화
 - 26-29 줄 : 관측 파라미터 설정
 - 33 줄 : 노출 시간 설정, 데이터 생성
 - 40-45 줄 : 데이터 변환, 그리기
 - 59-60 줄 : 데이터를 파일로 저장

```
1  from rtlsdr import RtlSdr
2  import numpy as np
3  import matplotlib.pyplot as plt
4  import scipy.signal as sig
5  import time
6
7  # Get a list of detected device serial numbers (str)
8  serial_numbers = RtlSdr.get_device_serial_addresses()
9  print(serial_numbers)
10 # Find the device index for a given serial number
11 device_index = RtlSdr.get_device_index_by_serial(serial_numbers[0])
12 print('device index= ', device_index)
13
14 sdr = RtlSdr(device_index)
15
16
17 # Or pass the serial number directly:
18 #sdr = RtlSdr(serial_number='00000001')
19 # but this does not work !!
20
21 # this also does not work
22 #sdr = RtlSdr()
23
24
25 # configure device
26 sdr.sample_rate = 2.048e6 # Hz
27 sdr.center_freq = 1420.406e6 # Hz
28 sdr.freq_correction = 1 # PPM
29 sdr.gain = 20
30 #sdr.gain = 'auto'
```

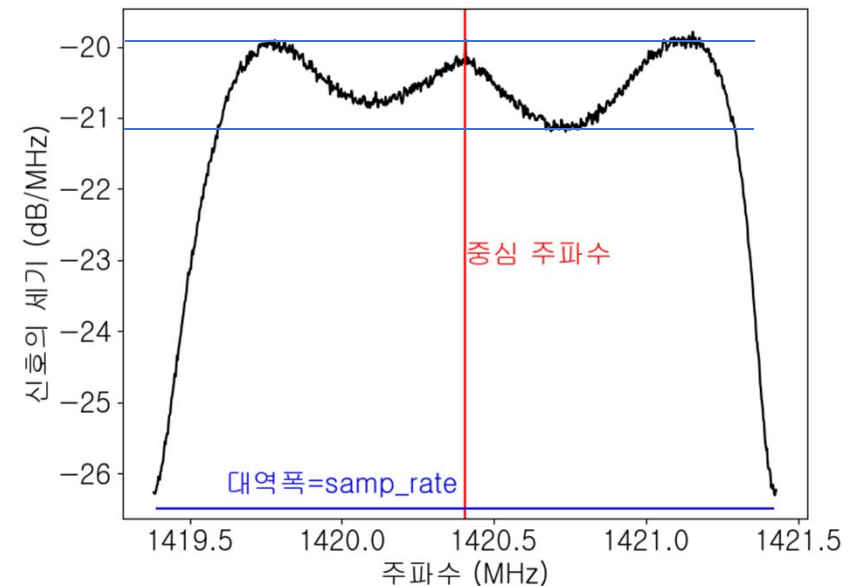
```

32 starttime=time.time()
33 samples = sdr.read_samples(100*1000*1024) # ~50 seconds
34 sdr.close()
35 time1=time.time()
36 print('Data taking time = ', time1-starttime)
37
38 # each method has its own pros and cons
39 #
40 S1,f=plt.psd(samples, NFFT=1024, Fs=sdr.sample_rate/1e6, Fc=sdr.center_freq/1e6,return_line=False)
41 #f,S=sig.welch(samples,fs=sdr.sample_rate/1.e6, window='hann',nperseg=1024) # real data only?
42 #f,S=sig.periodogram(samples,fs=sdr.sample_rate/1.e6) # real data only, and does not make a full use of input data?
43 time2=time.time()
44 print('Time taken for FFT =', time2-time1)
45 plt.show()
46 #print(S.shape)
47
48 '''
49 samples = sdr.read_samples(1024*1024)
50 S2,f=plt.psd(samples, NFFT=1024, Fs=sdr.sample_rate/1e6, Fc=sdr.center_freq/1e6,return_line=False)
51 samples = sdr.read_samples(1024*1024)
52 S3,f=plt.psd(samples, NFFT=1024, Fs=sdr.sample_rate/1e6, Fc=sdr.center_freq/1e6,return_line=False)
53 S=(S1+S2+S3)/3.
54 '''
55
56 #file = open('ambient_1_50.txt', 'w')
57 #file.write(S1)
58 #file.write(f)
59 np.savetxt("sky_7_50_S1.txt", S1, fmt = '%f', delimiter=' ')
60 np.savetxt("sky_7_50_f.txt", f, fmt = '%f', delimiter=' ')

```

• 파라미터 설정

- `sdr.center_freq=1420.406e6` : 중심 주파수
- `sdr.sample_rate=2.048e6` : 샘플링 속도(=한번에 볼 수 있는 대역폭)
- `sdr.freq_correction=1`
- `sdr.gain=50` : 관측을 하면서 중심부에 있는 데이터의 세기가 $-20 \pm 5 \text{ dB/Hz}$ 가 되도록 값을 조절 (오른쪽 그림 참조)
- 33번째 줄의 `sdr.read_samples( )` 안의 값 : 이 값을 2×10^6 으로 나눈 값이 노출시간이다.
- 40번째 줄 : `NFFT=1024`는 대역폭을 1024개의 채널로 나누어 데이터를 표시하겠다는 의미이다.



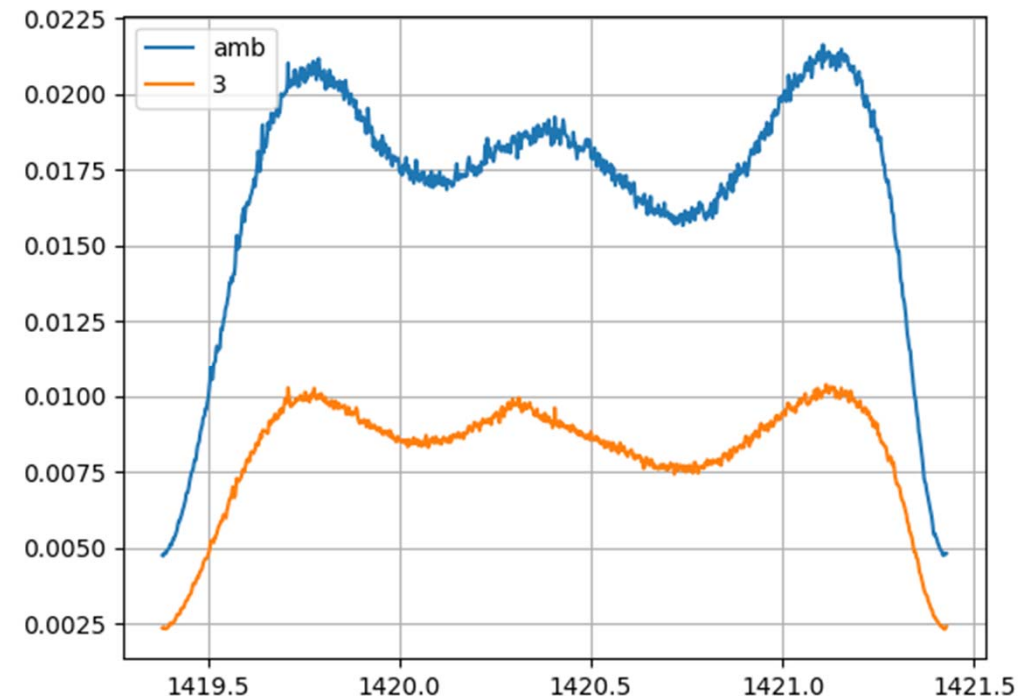
관측

- Target 관측
 - 보고자 하는 방향을 정하고 스텔라리움등을 참고해서 전파망원경을 그 방향으로 지향한다.
 - 앞의 파이선 프로그램을 돌리면 앞 슬라이드와 같은 그림이 나오고 데이터가 파일로 저장된다.
 - 프로그램안에 있는 파일 이름을 바꾸어 다음 관측은 다른 이름으로 저장되도록 한다.
- Calibration 관측
 - 보고자 하는 방향의 관측이 끝나면, calibration을 위해 전파망원경이 지면을 향하도록 하고, 관측을 수행한다.
- 필요에 따라 노출시간을 조절한다.
- 한 세트의 관측(target과 calibration 관측) 동안 sdr.gain값은 고정시킨다.

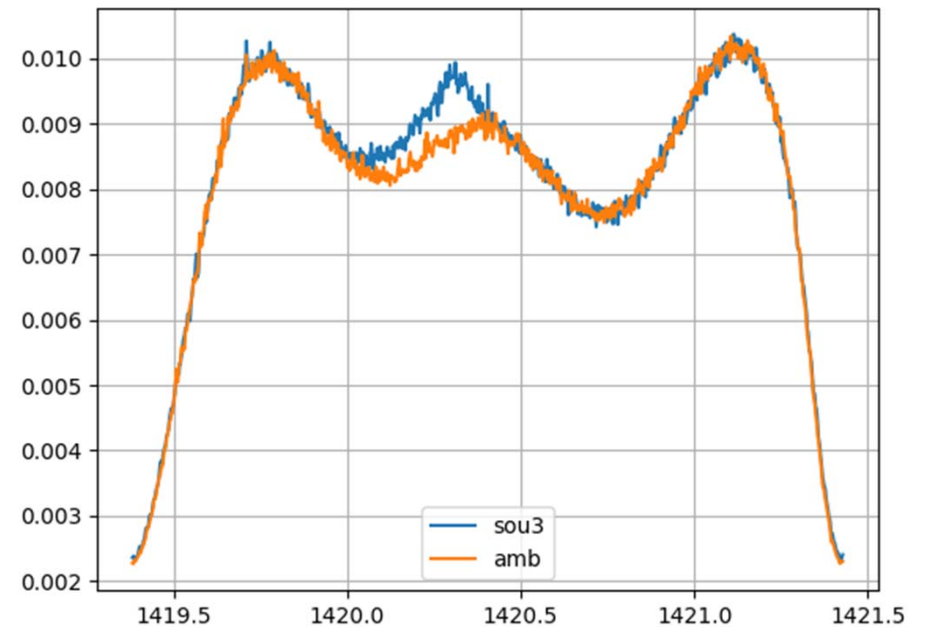
관측자료처리

관측자료처리의 원리

- Target을 향하고 관측해서 얻은 스펙트럼은 은하수 고유의 스펙트럼이 아니다.
- 잡음이 들어가고 주파수마다 증폭되는 정도가 다르기 때문이다.
- 오른쪽의 주황색 선이 은하수의 특정 방향으로 관측해서 얻은 스펙트럼이다. 중성수소 스펙트럼이 있는지 명확하지 않다. 대부분 잡음이고, 수신기의 주파수별 반응이 균일하지 않기 때문이다.



- 파란색 선이 지면을 향하고 얻은 스펙트럼인데, 이 데이터를 대략 2로 나누어 오른쪽처럼 스펙트럼 외곽이 일치하도록 하면 중심부에 중성수소의 스펙트럼이 비로소 확연하게 나타난다.
- 나누는 값은 관측할 때마다 달라질 수 있다.
- 원래는 신호가 없는 빈하늘을 관측해서 이 데이터를 얻어야 하는데, 중성수소의 경우 빈 하늘을 찾기 어려워 일종의 편법을 사용한 것이다.



Calibration

- $P_{sou,i}$: Target를 향했을 때 얻은 채널별 데이터
- $P_{amb,i}$: 지면을 보았을 때 얻은 채널별 데이터
- $P_{sky,i}$: 빈 하늘을 보았을 때 얻은 채널별 데이터(편법으로 $P_{amb,i}/2$ 사용)

이라고 하면, 아래처럼 쓸 수 있다.

$$P_{sou,i} = G_i(T_{sou,i} + T_{sys,i})$$

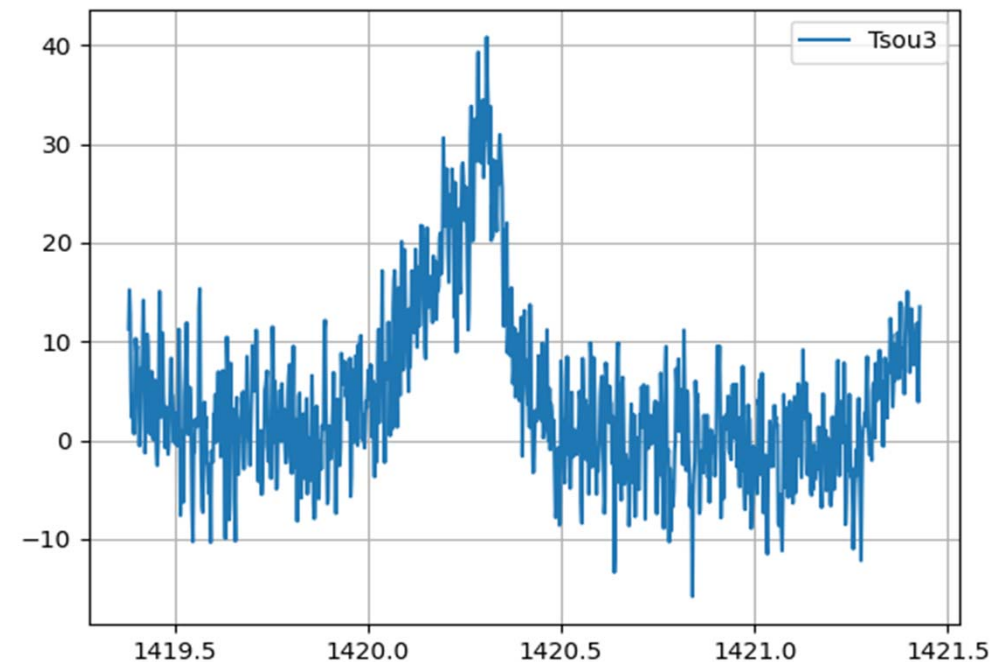
$$P_{amb,i} = G_i(T_{amb} + T_{sys,i})$$

$$P_{sky,i} = G_i(0 + T_{sys,i})$$

- 이 식들을 정리하면, 천체 고유의 스펙트럼은 아래처럼 쓸 수 있다.
($T_{amb} = 300$ K)

$$T_{sou,i} = \frac{P_{sou,i} - P_{sky,i}}{P_{amb,i} - P_{sky,i}} T_{amb}$$

- 오른쪽 그림은 이런 방식으로 calibration해서 얻은 천체 고유의 스펙트럼이다.



심화 학습

- 중성수소 스펙트럼을 구하는 것에서 더 나아가 아래와 같이 의문을 품고, 답을 탐구해 볼 수 있다.
 - 중성수소 스펙트럼에서 수소의 양을 측정할 수 있을까?
 - 우리은하가 회전한다고 하는데, 회전 속도를 측정할 수 있을까?
 - 우리은하 말고 다른 은하에서 나오는 수소 스펙트럼도 측정할 수 있을까?
 - 태양이나 달에서도 전파가 나올까?
 - 중성수소의 근처 주파수에서 우주에 있는 수산기(OH) 분자의 스펙트럼이 나온다고 하던데, 이것도 관측할 수 있나?