소리 파동의 물리 (20점)

우리 주변은 소리와 음향 효과로 가득 차 있다. 이 실험 문제는 초음파와 가청음 효과에 관한 것으로 네 부분으로 이루어진다. 파트 1에서는 초음파 마이크로폰 장치의 특성을 알아내야 한다. 그다음 간섭 현상을 관찰하고 설명한 뒤, 도플러 효과를 조사하고, 끝으로 사람 청각의 문턱값과 분해능을 구한다.

장치와 재료 목록

표지	부품	수량	표지	부품	수량
A	함수 발생기	1	**K**	자를 단 거울 자석 받침	1
B	초음파 증폭기	1	**L**	회전 원판	
C	교류 밀리볼트미터	1	**M**	광학대에 붙은 모터	1
D	주파수 계수기	1	**N**	연결용 동축 케이블	4
E	가변 직류 전원	1	**O**	각도계가 달린 회전 받침	1
F	광원용 초음파 변환기(빨간 표지)	1	**P**	스테레오 헤드폰	1
G	검출기용 초음파 마이크로폰(파란 표지)	1	**R**	광학대	1
H	광원 받침	1	**T**	가변 저항(레오스탯)	1
I	검출기 받침	1		자	
J	금속 거울/반사판	1			

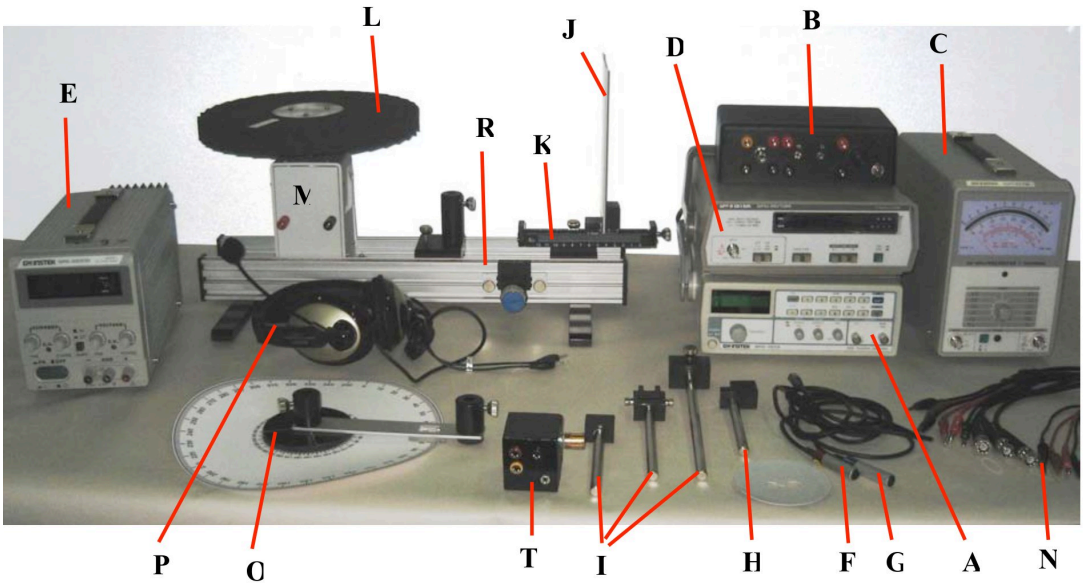
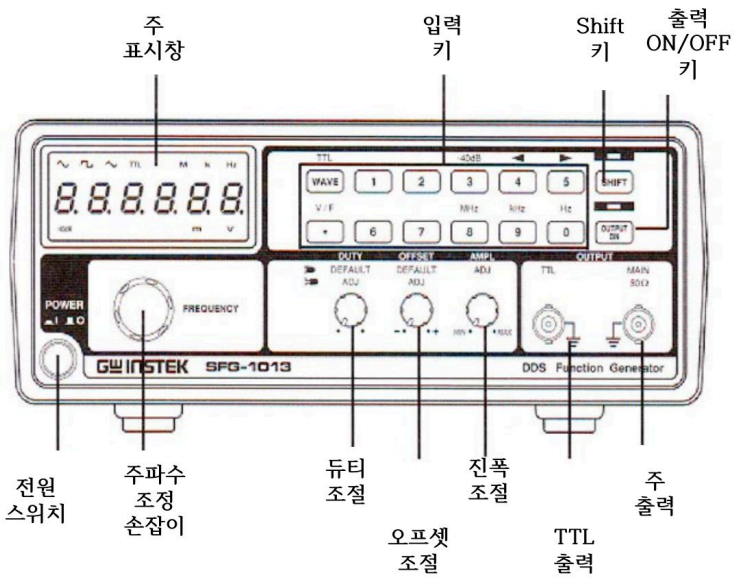


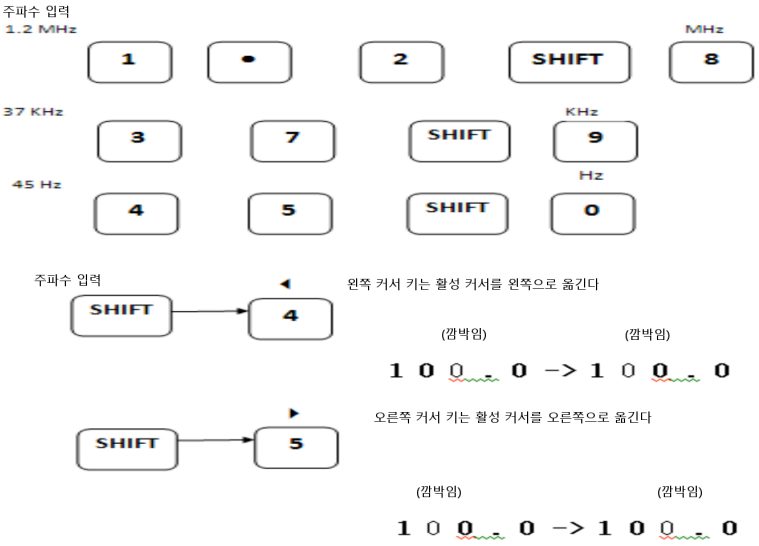
그림 1. 장치와 재료

장치와 재료 (계속)

1. **합성 함수 발생기 사용법 (품목 A)**



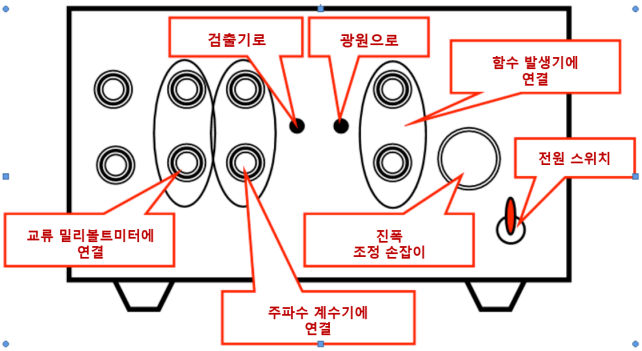
- 전원 단추를 한 번 누르면 “켜짐”, 다시 누르면 “꺼짐”이다.
- 주파수 범위를 고르고 알맞은 단추를 쓰시오. 주 표시창에서 커서(주파수 편집 위치)를 옮기려면 SHIFT 키를 누른 뒤 “4” 또는 “5” 키를 쓴다. 주파수 단위를 kHz로 정하려면 SHIFT 키와 함께 “9” 키를 쓴다.
- 주파수는 주 표시창에 나타난다. 발생기가 만드는 신호의 전압을 보려면 SHIFT 키와 함께 **V/F** 단추를 쓴다.



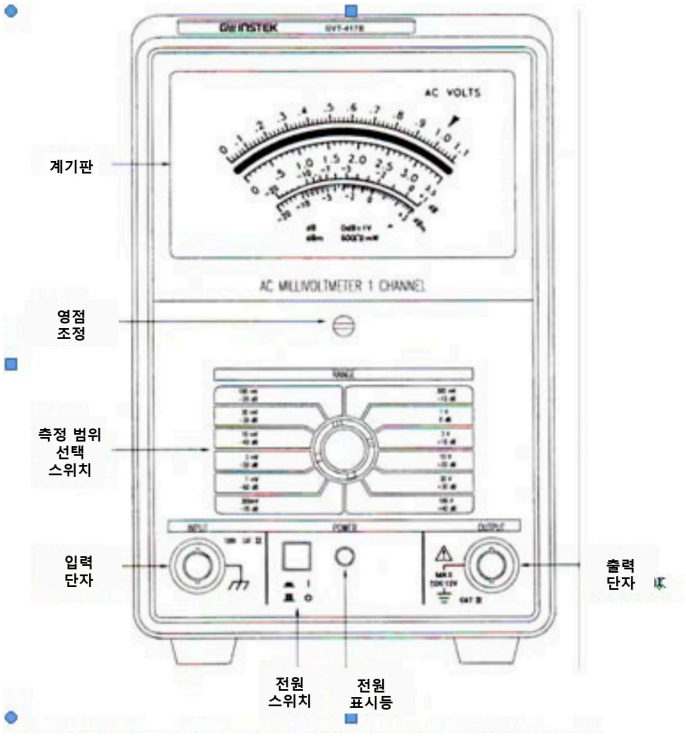
- 주파수 조정 손잡이로 알맞은 주파수에 맞춘다.
- 신호의 진폭을 바꾸려면 진폭 조절 손잡이를 쓸 수 있다.
- “출력 ON/OFF 키”를 켜야 한다. 그렇지 않으면 발생기가 마이크로폰에 신호를 보내지 않는다.
- 사인파 상태에서는 “듀티 조절”을 쓰지 마시오.

2. 증폭기 어댑터 (품목 B)

증폭기 자체는 아무 일도 하지 않는다. 그냥 두면 맞지 않을 플러그들을 연결해 주는 어댑터 역할만 한다.

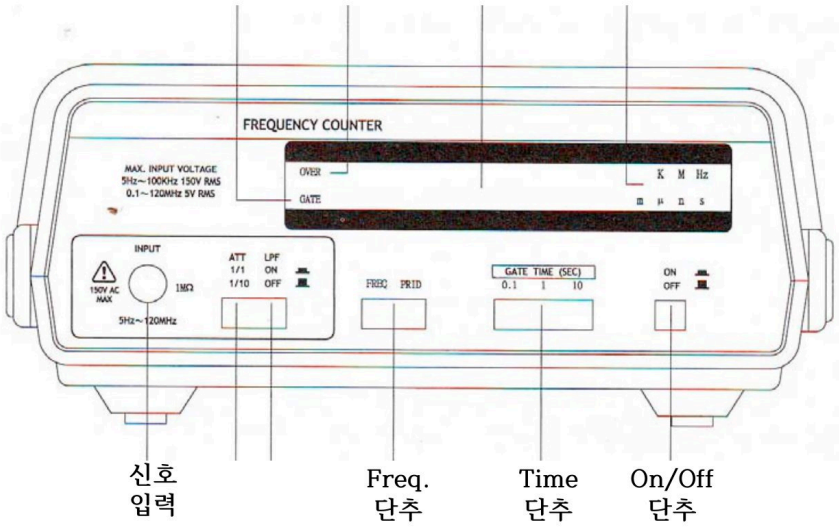


3. 교류 밀리볼트미터 (품목 C)



- 증폭기 어댑터에서 나온 BNC형 케이블을 INPUT 단자에 연결한다.
- RANGE를 100 V에 놓고 전원을 켠다.
- 바늘이 전체 눈금의 1/3 이상인 위치에 오도록 RANGE 선택 스위치를 바꾸면 쉽게 읽을 수 있다. 선택 스위치에 적힌 수는 그 범위에서 잴 수 있는 최댓값이다.

4. 주파수 계수기 (품목 D)



- 신호 케이블을 “신호 입력” 커넥터에 연결한다
- 주파수 계수기를 켠다
- “Freq. 단추”와 “Time 단추”를 누른다
  그러면 주파수 계수기가 측정할 준비가 된다.

주의: 모든 연결을 꽂거나 빼기 전에 반드시 장비의 전원을 끄시오. 그렇지 않으면 장비나 센서가 망가질 수 있다.

파트 1. 마이크로폰 장치의 특성 (3점)

들어가며

압전성이라 부르는 성질은, 매우 날카롭게 정해진 진동수에서 일어나는 결정의 역학적 진동과, 그 결정이 일부인 회로의 전기적 성질 사이를 편리하게 이어 준다. 압전 물질은 전기 신호와 소리 신호를 서로 바꾸는 데 쓰인다. 그러나 이들은 잘 정해진 작동 주파수 범위를 가진다는 특징이 있다. 그러므로 이 실험 부분에서는 압전 물질로 만든 마이크로폰을 쓰기 전에 그 물리적 성질을 구해야 한다.

부품 목록

1.	함수 발생기(FG)	5.	받침이 달린 광원(S)용 초음파 변환기
2.	초음파 증폭기	6.	받침이 달린 검출기(D)용 초음파 마이크로폰
3.	교류 밀리볼트미터(MV)	7.	연결용 동축 케이블 두 개
4.	각도계가 달린 회전 받침	8.	계산기

실험과 절차

초음파 마이크로폰 두 개를 쓴다. 하나는 신호원(빨간 표지)으로, 다른 하나는 신호 수신기(파란 표지)로 쓴다. 광원은 함수 발생기(FG)의 신호를 증폭기를 거쳐 받아 음파로 바꾼다. 전치 증폭기에 연결된 신호 수신기(검출기라 부를 수 있다)는 광원에서 나온 음파를 받아 전기 신호로 바꾼다. 출력 신호의 전압은 교류 밀리볼트미터로 잰다.

힌트: 광원(S)에 주는 신호의 전압은 1 V 근처로 맞추어야 한다. 이보다 크면 초음파가 포화되어 결과에 영향을 준다. 마이크로폰들은 회전 받침에 놓이며, 초음파 증폭기 구성의 전기 회로에 연결된다. 실험 중에는 광원과 검출기 사이의 거리를 바꾸지 마시오. 그리고 마이크로폰들이 받침 바닥에 평행하게 놓이고 마이크로폰들의 축이 한 직선 위에 놓이도록 하시오.

1a. (1.5점) FG 신호의 주파수를 바꾸면서 검출기가 변환한 출력 신호의 전압을 재시오. 입력 주파수 30 kHz에서 50 kHz 범위에서 재고, 광원에 보내는 신호의 주파수가 주어진 범위 안에 있도록 하시오. **그렇지 않으면 마이크로폰이 망가지거나 고장 난다.** FG 신호의 전압을 1 V 근처로 맞추시오. 측정 데이터는 표 1A에 채운다. 측정 데이터로 그래프를 그리시오. 측정한 *rms* 신호 전압을 주파수에 대해 그리고, 측정한 *rms* 신호 전압이 측정 최댓값의 $1/\sqrt{2}$로 떨어지는 차단 주파수 f_1, f_2를 구하시오. 이로부터 대역폭 $\Delta f = f_2 - f_1$을 구하시오. 얻은 결과에서 작동 주파수 f_w(검출기 신호의 전압이 최대가 되는 주파수)를 구하시오.

1b. (1.5점) FG의 주파수를 작동 주파수에 맞추시오. 광원에 대한 검출기의 위치에 따라 출력 신호의 세기가 각도에 어떻게 의존하는지 구하시오. 측정 데이터를 표 1B에 적으시오. 전압비 $A(\varphi)/A(0)$를 각 φ에 대해 그리시오. 여기서 $A(\varphi)$와 $A(0)$은 각각 각 φ와 0°에서 출력 신호의 전압이다. 방향 $\varphi = 0°$에서 검출이 최대이며, 이를 광원의 축이라 한다. 검출 신호의 전압이 2배, 3배로 줄어드는 각의 값을 구하시오.

파트 2. 파동의 간섭 (6점)

들어가며

정상파 무늬는 거울에서 반사된 파동이 광원에서 오는 입사파와 간섭할 때 매질 안에 생기는 진동 무늬이다. 파동들이 간섭하여 매질을 따라 같은 위치에 변위가 없는 점들이 생긴다. 매질을 따라 있는 이런 점들을 **마디**라 한다. 매질에는 큰 양의 변위와 큰 음의 변위 사이를 진동하는 다른 점들도 있다. 이런 점들을 **배**라 한다.

부품 목록

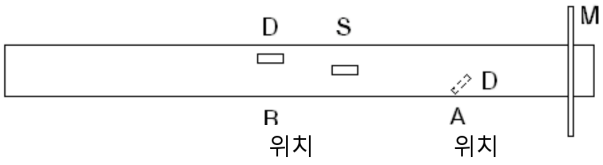
1.	함수 발생기(A)	6.	금속 거울(J)과 자를 단 자석 받침(K)
2.	초음파 증폭기(B)	7.	광학대(R)
3.	교류 밀리볼트미터(C)	8.	연결용 동축 케이블 두 개(N)
4.	받침(H)이 달린 광원(F)용 초음파 변환기	9.	계산기(X)
5.	받침(I)이 달린 검출기(G)용 초음파 마이크로폰		

실험 설명

2a. 파동의 간섭 조사 (1.6점)

위 목록의 기구 1–8을 써서 그림 2.1의 실험 장치를 꾸미고 파동의 간섭을 조사하시오. 원하지 않는 간섭을 줄이려면 주의하여 다른 기구들을 검출기에서 멀리 두시오. 함수 발생기를 광원에 연결하고 주파수를 40 kHz에 맞추시오.

위에서 본 그림



옆에서 본 그림

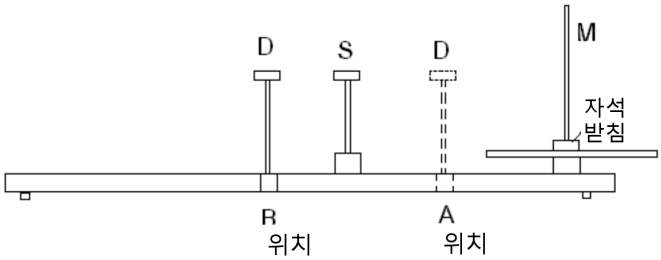


그림 2.1. 파동의 간섭 조사.
위치 A: 검출기를 광원과 거울 사이에 둔다.
위치 B: 검출기를 광원 뒤에 둔다.
S - 광원, M - 거울, D - 검출기

2a.1. 검출기를 그림 2.1의 위치 A에 놓고, 검출 신호의 세기가 S, M, D의 위치에 어떻게 의존하는지 관찰하시오. 검출기가 광원에 너무 가까우면 불분명한 효과가 생기므로 광원에 가까운 거리에서는 재지 마시오. 검출기에는 각도 감도가 있음을 기억하시오. 검출기는 측정이 가장 잘 되도록 놓아야 한다.

2a.2. 검출기를 그림 2.1의 위치 B에 놓고, 검출 신호의 세기가 M과 D의 위치에 어떻게 의존하는지 관찰하시오. S의 위치는 고정해야 한다.

2a.3. **파장의 측정.**
실험 2a.1에서처럼 S와 D의 위치를 고정하고 M을 움직여, 초음파의 파장 **λ**를 실험으로 구하시오.

2b. 다음 진술들이 맞는지 실험으로 알아내시오. (2.8점)
답안지에서 고른 진술의 표지 아래에 맞으면 "√", 틀리면 "X"를 적으시오.

a. S와 M 사이에서 정상파가 관찰된다(그림 2.1). 이 정상파는 S와 M 사이의 거리가 어떤 값이든 생긴다.
b. S와 M 사이에서 정상파가 관찰된다. 이 정상파는 S와 M 사이의 거리가 **nλ/2**일 때만 생긴다. 여기서 **n**은 정수이다.
c. 위치 A와 B 모두에서 검출기는 정상파의 마디와 배를 검출한다. 이는 S와 M의 위치를 움직여 확인할 수 있다.
d. 정상파는 S와 M 사이의 거리가 어떤 값이든 생긴다. 이는 D의 위치를 움직여 실험으로 관찰할 수 있다. 위치 B에서 검출기는 S와 M 사이의 거리가 **SM=nλ/4**일 때 높은 신호 세기를 검출한다. 여기서 **n**은 홀수이다.
e. S와 M을 움직이면 마디와 배의 위치는 실험실 틀(광학대)에 대해 움직이지 않는다.
f. S와 M 사이의 거리를 늘리면 위치 B에서 반사파의 세기는 진폭이 줄어들며 주기적으로 변한다.
g. 정상파는 S와 M 사이에서만 생기고, 광원 뒤에서는 반사파가 관찰된다.

2c. 정상파의 조사 (1.6점)
위치 B에서 M을 움직이면 검출기는 신호 세기의 최댓값과 최솟값을 검출한다. 이 경우들에서 거울과 광원의 표면에 마디와 배 가운데 어느 것이 생기는지 밝히시오. 마디로 판단하면 "N", 배로 판단하면 "A"를 표에 적으시오.

조건	**거울의 표면에서**	**광원의 표면에서**
D가 최댓값을 검출할 때		
D가 최솟값을 검출할 때		

파트 3. 도플러 효과 (8점)

광원과 관찰자의 상대 운동 때문에 관찰되고 측정되는 신호의 진동수가 바뀐다. 이를 도플러 효과라 한다.

관찰되는 진동수는 다음 식으로 주어진다.

$$f = f_o \frac{c - v_d}{c + v_s} \qquad \text{(광원과 검출기가 멀어질 때)} \qquad (1)$$

$$f = f_o \frac{c + v_d}{c - v_s} \qquad \text{(광원과 검출기가 가까워질 때)} \qquad (2)$$

여기서

f_o 광원이 내는 파동의 진동수

c 공기 중 소리의 속력

v_d 검출기의 속도

v_s 광원의 속도

부품 목록

1.	함수 발생기(FG)	7.	모터
2.	초음파 증폭기	8.	회전 원판
3.	교류 밀리볼트미터(MV)	9.	직류 전원
4.	주파수 계수기(FC)	10.	광학대
5.	받침이 달린 광원(S)용 초음파 변환기	11.	연결용 동축 케이블
6.	받침이 달린 검출기(D)용 초음파 마이크로폰		

실험 설명

광원(S)은 초음파가 회전 원판의 기울어진 톱니에 옆에서 부딪히도록 놓고, 검출기는 반사된 초음파를 더 잘 검출하도록 놓는다. 광원은 함수 발생기의 출력에 연결하고, 검출기는 파트 1에서 설명한 것처럼 소리 세기 수준을 검출하는 밀리볼트미터에 연결한다. 실험을 시작하기 전에 원판을 손으로 앞뒤로 움직이며 소리 세기 수준의 변화를 확인해야 한다. 소리 세기 수준의 변화가 작으면 음원과 수신기의 위치를 알맞게 조정해야 한다. **장치를 알맞게 조정하지 않으면 소리 세기 수준과 진동수의 측정에 오차가 생길 수 있다.**

- 회전 원판의 모터를 켜시오
- 회전 원판 모터의 전압을 살살 높이면서 소리 진동수의 변화를 관찰하시오
- 파트 3의 측정을 위해 기구들을 준비해야 하며, 파트 1과 파트 2의 결과를 쓰는 것이 좋다. 예컨대 작동 주파수를 맞추는 것 등이다. 작동 주파수를 구하지 못했다면 40 kHz를 작동 주파수로 쓰시오. FG 신호의 전압이 포화되지 않도록 하시오.

3a. 회전 원판에서 나오는 소리의 도플러 이동 공식. (1.5점)

- 광원에서 나온 음파가 회전 원판의 톱니(그림 1)에서 반사되면서 도플러 효과가 일어난다. 톱니가 R 방향으로 움직이는 속도를 v라 할 때, 이 경우에 대해 f를 f_o, c, v로 나타내는 식을 구하시오. 실험 장치에서 각도 의존성이 무시할 만하거나, 입사각과 반사각이 5°보다 작도록 하시오.
- 얻은 식으로부터, $v \ll c$인 경우에 대해 약어 $\Delta f = |f - f_0|$를 써서 $\Delta f/f_0$를 v/c의 함수로 나타내는 간단한 식을 쓰시오. 여기서 f_0는 작동 주파수이다. 유도 과정 전체를 답안지에 적어야 한다.

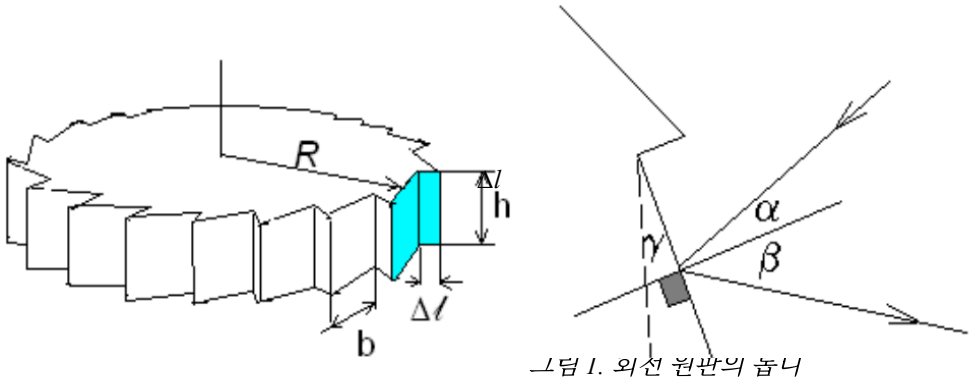


그림 1. 외선 원판의 톱니

3b. 회전 원판에서의 도플러 효과 계산 (1.4점)

톱니 가운데 점의 지름 방향 속도 v를 회전 원판의 각속도 Ω와 Δl로 나타내는 식을 유도하시오. (이후 계산에 쓸 톱니의 높이는 Δl=4.37 ± 0.05 *mm*이다.)

3c. 모터 전압에 따른 도플러 효과 (2.8점)

검출기가 검출한 초음파 신호의 진동수를 모터 전압 16 V까지의 함수로 재시오. $\Delta f/f_o$ 대 U의 그래프를 그리시오. 큰 U에서의 그래프로부터, Δf의 외삽이 0으로 가는 문턱 전압 U_t의 값과 그래프의 기울기를 측정 오차와 함께 구하시오.

힌트: 회전 원판을 시계 방향(CW)으로 돌게 하고 이후로는 바꾸지 마시오. 더 안정적이고 효과적으로 잴 수 있는 검출기 위치를 고르시오. 시간을 아끼려면 과제 3d를 위한 전류를 모터 전압 측정과 동시에 재도 된다.
실험에 쓰는 장비들은 쓰기 전에 잘 보정하고 재 두시오. 각 장치에는 따로 주어진 사양서가 있다. 예컨대 10 V 전압에서 도플러 효과의 진동수 이동이 사양서에 주어져 있다. 이 실험 결과를 써서 장치를 보정해야 한다. 그렇지 않으면 측정이 부정확해진다.

3d. U에 대한 Ω의 선형 의존성 (0.8점)

사양서에서 (CW 방향에 대한) 각속도 Ω, 전압 U, 전류 I를 측정 오차와 함께 찾고, U에 대한 Ω의 선형 의존성의 수치 계수와 오차를 계산하시오. 높은 전압에서 Ω는

전압에 거의 비례한다고 가정하시오. 사양서에서 얻은 값을 답안지에 적어야 한다.

3e. 도플러 효과로 구한 공기 중 소리의 속력 (1.5점)

함수 관계 $|\Delta f|/f_o$ vs. v와 $|\Delta f|/f_o$ vs. U를 합쳐, 이로부터 공기 중 소리의 속력을 측정 오차와 함께 구하시오. 공기 중 소리 속력의 실험값과 이론값을 써서 실험의 상대 오차 $\frac{c_{exp} - c_{theor}}{c_{theor}} \times 100\ \%$를 구하시오.

여기서 c_{theor} = 343 m/s는 20 C에서 가청 범위 소리의 공기 중 속력이다. 이 값은 이 부분에서만 쓸 수 있다.

파트 4: 청각의 문턱값과 분해능 (3점)

청각의 문턱값은 우리 귀가 겨우 들을 수 있는 소리 세기(W/m^2 단위)이다. 이 문턱값은 소리의 진동수에 달려 있다. 약 2000 Hz에서 청각의 문턱값은 10^{-12} W/m^{2}이다. 비 $\log_{10}$(I/Io)를 소리 세기 수준이라 하며, 벨(B)이라는 단위로 잰다. 실제로는 비 β(dB 단위) = 10 $\log_{10}$(I/Io)를 쓰는 것이 더 편하다. 사람의 귀는 약 20 Hz에서 약 20,000 Hz까지의 소리를 들을 수 있다. 이를 가청 범위라 한다.

장치와 부속품 목록

이 실험에는 다음 품목이 필요하다(그림 4.1).

1) 함수 발생기 (**a**)
2) 교류 밀리볼트미터 (**b**)
3) 케이블 커넥터 (**c, d**)
4) 가변 저항(레오스탯) (**e**)
5) 헤드폰 (**f**)

준비

1. 그림 4.2처럼 실험 장치를 연결하시오.
2. 교류 밀리볼트미터와 함수 발생기의 전원을 켜시오.
3. ADJ 단추를 돌려 가운데 위치에 놓으시오.

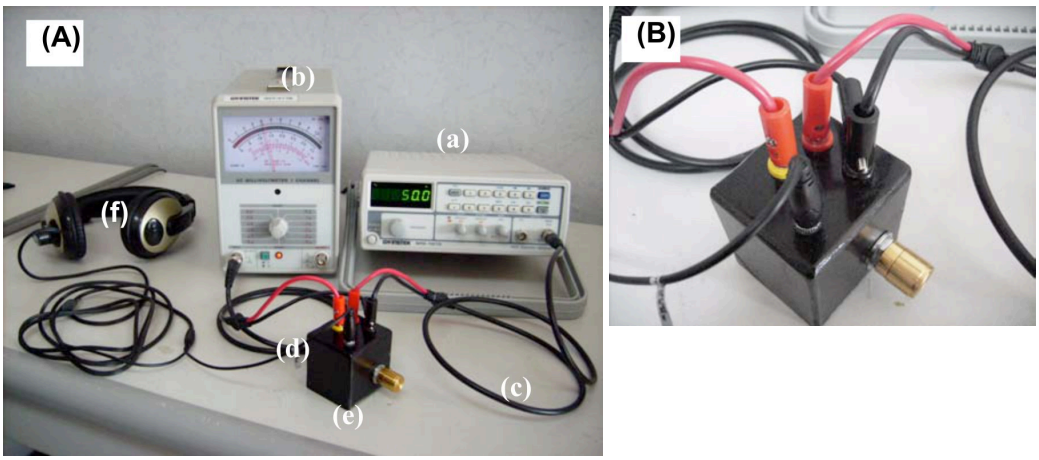


그림 4.1 (A). 장치들의 연결. **(B)** 레오스탯에 도선 연결: 함수 발생기의 빨간 도선은 빨간 소켓에, 검은 도선은 검은 소켓에 꽂는다. 교류 밀리볼트미터의 빨간 도선은 노란 소켓에, 검은 도선은 검은 소켓에 연결한다. 헤드폰 도선은 헤드폰 소켓에 꽂는다.

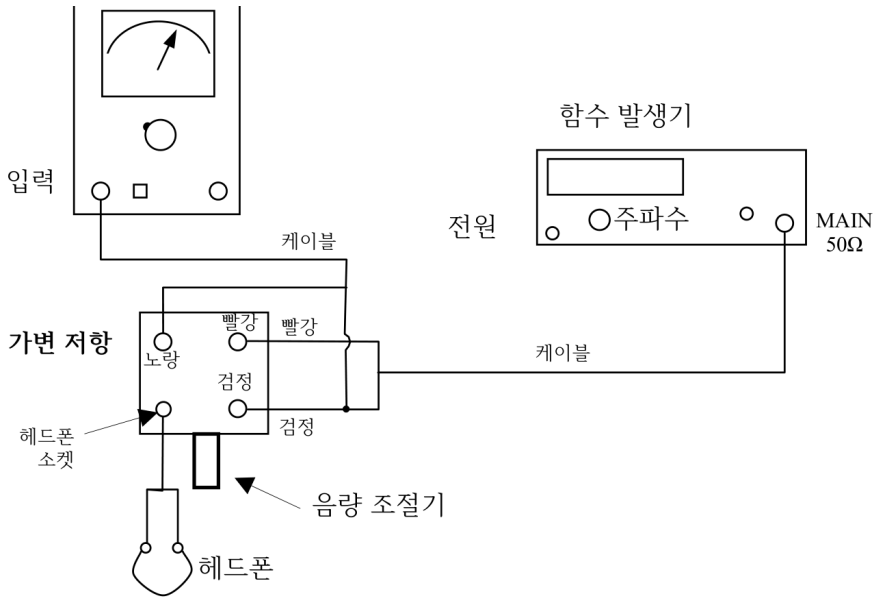


그림 4.2. 연결도.

측정

4a. 자기 청각의 주파수 영역 (0.5점)

A. 들을 수 있는 가장 낮은 주파수 f_{low} 구하기, 그리고 **B.** 들을 수 있는 가장 높은 주파수 f_{high} 구하기

1. 레오스탯의 음량 조절기로 헤드폰의 음량을 최대로 맞추시오.
2. 들을 수 있는 가장 낮은 주파수 f_{low}를 찾으시오. 그러려면 소리 세기와 주파수를 모두 바꾸어야 한다. 주파수를 바꾸려면 함수 발생기의 주파수 단추를 쓴다. 소리 세기를 바꾸려면 레오스탯과 함수 발생기의 AMPL ADJ 단추를 쓸 수 있다.
3. 비슷한 절차로 f_{high}를 찾으시오.

4b. 가장 잘 들리는 주파수 영역 (1점)

1. 소리 세기를 단계적으로 낮추시오. 각 단계에서 f_{low}와 f_{high}를 찾으시오. 될 수 있는 한 가장 낮은 소리 세기 수준을 들을 수 있는 영역을 찾으시오. 이 영역의 하한이 가장 잘 들리는 주파수 영역의 가장 낮은 주파수 f_{th1}이고, 상한이 가장 잘 들리는 주파수 영역의 가장 높은 주파수 f_{th2}이다.

이 두 한계의 평균, 곧 가장 민감하게 들리는 주파수는 다음과 같다.

$$f_{th} = \frac{f_{th1} + f_{th2}}{2}$$

4c. 소리의 여러 주파수에 대한 귀의 분해능(*R*). (1.0점)

귀의 분해능은 가까운 두 주파수를 구별하는 능력이다.

1. 발생기의 주파수를 f_{th}에 맞추시오.
2. 헤드폰으로 들으면서 세기를 잘 들리는 수준으로 바꾸시오.
3. 주파수를 조금 바꾸시오. f_{th}와 바뀐 주파수의 차이를 들을 수 없으면 차이를 조금 더 크게 하시오. f_{th}와 다르게 들리는 주파수를 찾으시오. f_{th}와 바뀐 주파수의 차가 f_{th}에서 귀가 분해할 수 있는 주파수이다.
4. f_{th}에 대해 분해 가능한 주파수(Δf)와 분해능 $R = f/\Delta f$를 계산하시오.

4d. 위의 주파수 영역에서 자기 귀로 검출할 수 있는 도플러 효과를 주는 거울의 최소 속력을 구하시오. **(0.5점)**

다음 공식을 써서 거울의 속력과 그 오차를 어림하시오.

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{2v}{c}$$

여기서 c = 343 m/s는 20 C에서 가청 범위 소리의 공기 중 속력이다. 이 값은 이 부분에서만 쓸 수 있다.