

# 기주공명 실험장치 설명서 (WA-9612)

## Resonance Tube



제작사: PASCO Scientific

한국대리점: (주)와이케이사이언스 TEL: 02)546-1565

목	차
---	---

## 목 차

### 색 선

### Section Page

저작권, 품질보증 및 장비반송

### 서 론

장비와 셋업

기주공명실험장치 사용하기:

PASCO 시리즈 6500 컴퓨터 인터페이스와 함께 사용하는 경우

전력증폭기와 함께 사용하는 경우

데이터 모니터 프로그램과 함께 사용하는 경우

관 내 파동에 관한 이론

### 실 험:

실험 1: 관의 공명주파수

실험 2: 관 내에 발생한 정상파

실험 3: 관의 길이와 공명모드

실험 4: 관 내의 음속

제안된 실험

제안된 연구주제

교사용 가이드

기술지원

## 서론

PASCO 모델 WA-9612 기주공명실험장치를 사용하면 관 내에서의 음파의 전달을 조사할 수 있다. 닫힌 관 혹은 열린 관 내에서의 정상파의 패턴을 관찰할 수 있으며, 관의 길이를 달리해가면서 마디와 배의 위치를 찾아낼 수도 있다. 또한 공명모드의 주파수와 파장을 측정하면 간접적으로, 제동기가 장착된 오실로스코프를 사용해 음파의 파동이 관을 통과하는데 걸리는 시간을 측정하면 보다 더 직접적으로 관 내에서의 음파의 속도를 측정할 수 있다. 관에는 닫거나 열 수 있는 2개의 구멍이 있어 관악기의 물리적 특성도 조사할 수가 있다.

관 내의 파동은 스피커로 발생시키고 소형 마이크로 탐지한다. 마이크를 스피커 옆에 장착하면 공명모드를 탐지할 수 있고, 막대에 장착하여 관을 통과시키면 관 내에 발생한 파동의 특성을 조사할 수 있다.

▶ 주의: 공명관을 사용하려면 마이크가 탐지한 신호를 조사할 수 있는 오실로스코프와 32 Ω 0.1W의 스피커를 작동시킬 수 있는 신호발생기가 필요하다.

## 장비와 셋업

WA-9612 기주공명실험장치는 다음의 장비로 구성된다(그림 1 참조):

- 미터 눈금이 그려져 있는 90 cm의 투명한 플라스틱 관
- 튜브 장치용 받침대 2개, 스피커가 내장된 받침대 1개, 마이크용 받침대
- 배터리로 작동하는 증폭기가 장착된 소형 마이크(배터리 포함)와 오실로스코프에 직접 장착할 수 있는 동축커넥터
- 가동피스톤
- 마이크 프로브로드(probe rod) (86 cm의 황동막대, 그림에 없음)
- 클램프가 달린 구멍 마개

**필요한 장비:**

- 32 Ω, 0.1 W의 스피커를 작동시킬 수 있는 함수 발생기(PASCO PI-9587B 디지털 함수발생기 같은 함수 발생기)
- 오실로스코프(PASCO SB-9591 같은 오실로스코프)

- 함수발생기를 스피커에 연결할 수 있는 바나나플러그접속와이어

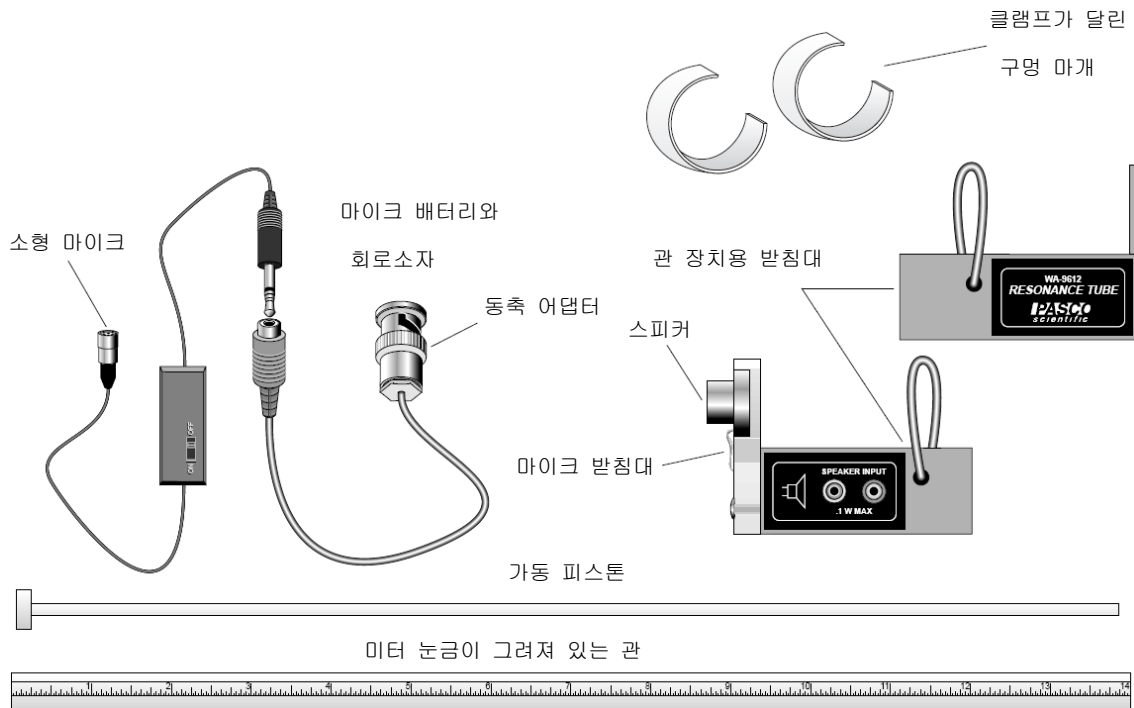


그림 1 WA-9612 기주공명실험장치의 구성 장비

#### 기주공명실험장치 장치하기(그림 2 참조):

① 그림 2에 보이는 것과 같이 장비를 장치한다. 마이크는 스피커 아래에 있는 마이크 장착용 구멍에 장착할 수 있다. 또 관 내에서 마디와 배의 위치를 찾아내고자 할 때에는 아래에 삽입된 그림에 보이는 것과 같이, 마이크를 테이프로 마이크 프로브로드 끝에 붙인 다음 장치용 구멍에 끼워 넣을 수 있다. 위에 삽입된 그림에 보이는 것과 같이 가동 피스톤을 쏘으면 관의 유효길이도 변경할 수 있다. 관의 바깥쪽에 있는 피스톤 막대의 끝부분을 받쳐서 피스톤에 지나친 변형력(strain)이 가해지지 않게 해야 한다.

② 함수 발생기의 주파수는 약 100 Hz로, 진폭은 0으로 설정한 다음, 함수발생기를 켜다. 스피커에서 소리가 날 때까지 천천히 진폭을 증가시킨다.

▶주의: 스피커를 과도하게 작동시키면 스피커가 파손될 수 있다. 조심스럽게 진폭을 증가시킨다. 스피커에서 나는 소리는 뚜렷하게 들려야 하나 지나치게 커서는 안 된다. 다수의 함수발생기들은 고 주파수에서 더 효율적이므로, 주파수를 증가시킬 때에는 진폭을 감소시켜야 할 필요가 있다.

③ 오실로스코프를 켜고 배터리로 작동하는 증폭기의 스위치를 켜다. 주사속도(sweep speed)는 신호 발생기의 주파수와 거의 일치하게 설정하고 마이크에서 나오는 신호가 분명하게 보일 때까지 증가시킨다. 최대로 증가시켰어도

마이크에서 나오는 신호가 보이지 않는 경우에는 스피커에서 나오는 소리가 최대가 될 때까지 신호발생기의 주파수를 조절한다. 그리고 나서 오실로스코프 상에 신호가 분명하게 보일 때까지 신호발생기의 진폭을 증가시킨다.

④ 이제 음파의 주파수나 관의 길이를 조절하면서 최대 음을 귀담아 듣고/듣거나 오실로스코프 상의 최대 신호를 관찰하면 공명모드를 찾을 수 있다.

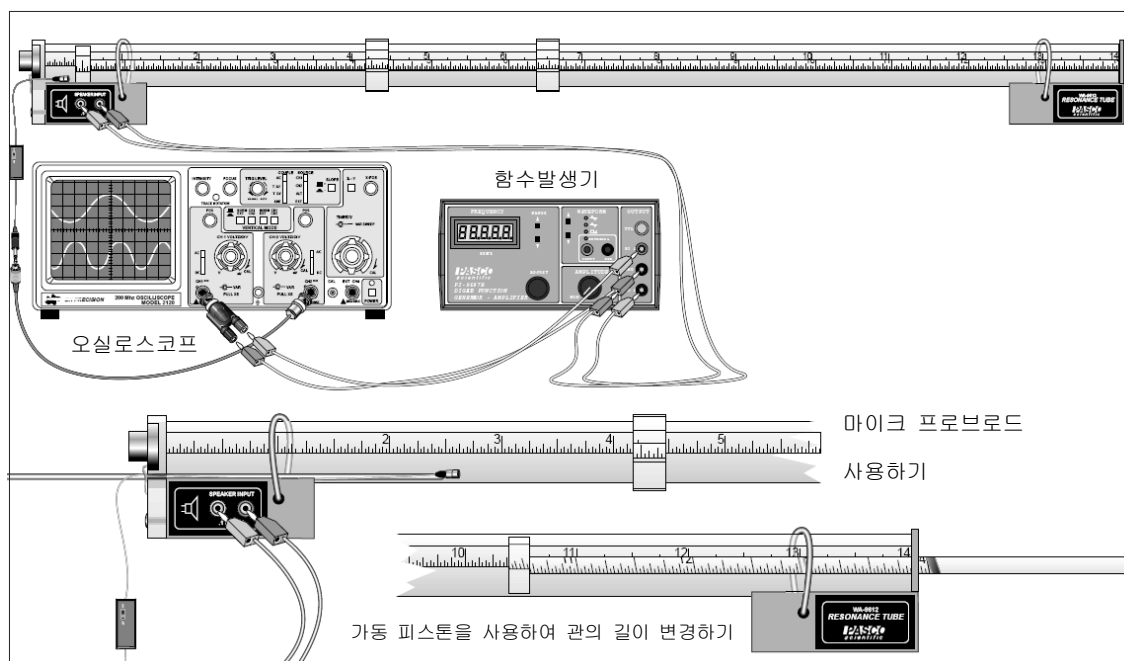


그림 2 장비셋업

▶주의: 대부분의 교과서에서, 열린 관은 양쪽 끝이 열린 관으로 간주된다. 닫힌 관은 한쪽 끝은 닫혀있고 다른 쪽 끝은 열린 관으로 간주된다. 이와 같은 관행에 유의하여, 스피커와 마이크는 관 끝에서 뒤로 몇 cm 떨어진 곳에 배치하여야 하므로, 마이크/스피커가 장착된 관의 끝부분은 열려있게 된다.

관 내에 공명모드가 일어나면, 닫힌 관 끝에는 항상 압력 배(변위 마디)가 존재하게 된다. 열린 관의 끝은 대체로 압력 마디(변위 배)와 일치한다. 그러나 압력 배는 일반적으로 관 끝에 정확하게 위치하지는 않는다. 마이크를 사용하면 열린 끝의 가까이에서 음파의 작용을 조사할 수 있다.

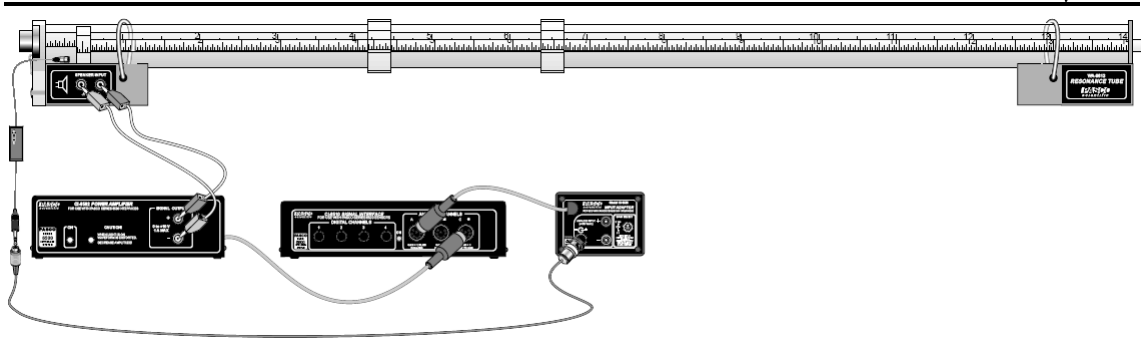


그림 3

### PASCO 시리즈 6500 컴퓨터 인터페이스와 함께 기주공명실험장치 사용하기

기주공명실험장치와 PASCO 시리즈-6500 컴퓨터 인터페이스를 사용하는 방법은 CI-6502 전력증폭기로 기주공명실험장치를 작동시키고자 하느냐, 아니면 별도의 함수 발생기로 기주공명실험장치를 작동시키고자 하느냐에 따라 2가지 방법이 있다.

#### 전력 증폭기 사용하기:

전력 증폭기의 DIN플러그를 인터페이스의 채널 C에 연결한다. 전력증폭기의 출력을 기주공명실험장치의 스피커에 연결한다. 그러나 전력 증폭기는 프로그램 내부로부터 출력진폭을 설정한 후에 켜야 한다.

기주공명실험장치의 마이크에 있는 BNC 플러그는 CI-6508 입력 어댑터 박스에 있는 BNC 잭에, 어댑터 박스에 있는 DIN플러그는 인터페이스의 채널 A에 연결한다. CI-6508에 있는 증폭 선택 스위치를 100x로 돌린다. (그림 3을 참조한다.)

프로그램을 시작한다. (필요한 경우, 프로그램 조작에 관한 세부사항은 설명서를 참고한다.) 출력을 1V의 사인파로 설정한 다음, CI-6502 전력 증폭기를 켜다. 스피커의 출력과 관의 파형을 모두 볼 수 있도록 채널 A와 채널 C를 화면에 표시한다.

#### 함수 발생기 사용하기:

기주공명실험장치의 마이크에 있는 BNC 플러그는 CI-6508 입력 어댑터 박스에 있는 BNC 잭에, 어댑터 박스에 있는 DIN 플러그는 시리즈-6500의 채널 A에 연결한다. CI-6508에 있는 증폭선택스위치를 100x로 돌린다.

CI-6503 전압센서가 있는 경우에는 그것으로 함수발생기와 CI-6500의 채널 B를 연결한다. (이 단계는 선택적이다; CI-6503 전압센서를 사용하면 트리거링(triggering)에 함수발생기를 사용할 수 있고, 결과도 다소 개선된다.) 그림 4를 참조한다.

프로그램을 시작한다. (필요한 경우, 프로그램 조작에 관한 세부사항은 설명서를 참조한다.)  
오실로스코프 모드에서는 채널 B에서 트리거링을 자동으로 설정한다. 채널 A와 채널 B를  
화면에 표시하고 관심이 있는 공명을 찾아낸다. 원한다면, 주파수분석옵션(FFT)을 켜서  
정상파를 발생시키는 주파수를 관찰한다.

(\*Available only for the 맥킨토시® 와 데이터 모니터의 MS-DOS버전에만 사용할 수 있다.)

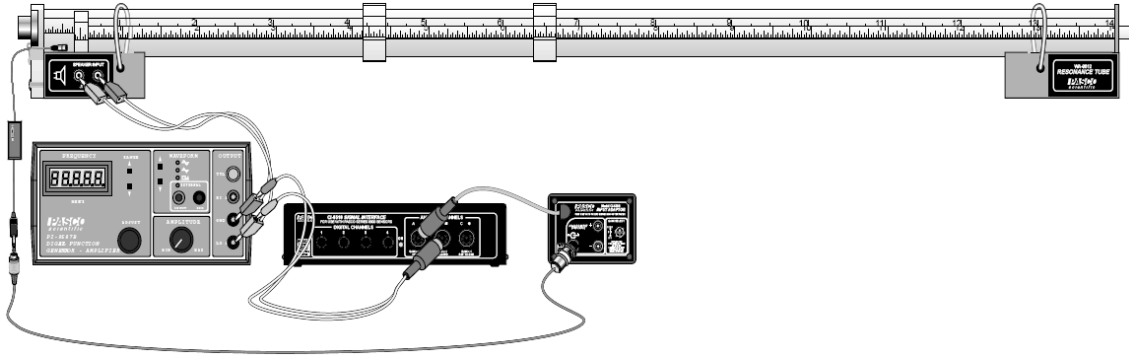


그림 4

## 관 내에 발생한 파동에 관한 이론

### 음파

스피커의 진동판이 진동하면 공기를 통해 전달되는 음파가 발생한다. 음파는 스피커에  
가까워졌다 멀어졌다 하는 공기분자의 작은 운동으로 이루어진다. 스피커 가까이에 있는  
소량의 공기를 볼 수만 있다면, 많은 공기가 멀리까지 이동하는 것이 아니라 반대로 공기가  
스피커의 진동 주파수에서 스피커에 가까워졌다 멀어졌다 하면서 진동하는 것을 발견할 수  
있었을 것이다. 이러한 운동은 스트링에서 전달되는 파동과 대단히 유사하다. 중요한  
차이점은 스트링의 작은 부분을 관찰해보면 스트링의 진동 운동 방향은 스트링에 발생한  
파동의 전달방향을 가로지른다는 것이다. 음파에서 소량의 공기의 운동은 파동의  
전달방향에 평행하다. 이러한 이유 때문에, 음파는 종파로 불린다.

음파를 개념화하는 또 다른 방법은 압축과 희박화의 연속으로 보는 것이다. 스피커의  
진동판이 바깥쪽으로 이동할 때, 진동판 가까이에 있던 공기는 압축되고 상대적으로 높은  
공기압, 즉 압축을 소량 발생시킨다. 이렇게 발생한 소량의 높은 공기압은 근처의 공기를  
압축하고, 압축된 공기는 차례로 근처의 공기를 압축하여, 그 결과 높은 압력은  
스피커로부터 멀리 전달되게 된다. 스피커의 진동판이 안쪽으로 이동할 때, 진동판

근처에는 낮은 공기압, 즉 희박화가 발생한다. 희박화 역시 스피커로부터 멀리 전달된다.

일반적으로, 음파는 파동샘에서 모든 방향으로 전달된다. 그러나 기주공명실험장치를 사용해 실험할 때처럼, 전달 운동을 1차원으로 제한하면 음파에 대한 연구를 간소화할 수 있다.

### 관 내에 발생한 정상파

되돌아오는 파동이 원래의 파동을 간섭하도록 스프링의 한쪽 끝에서 파동을 반사시키면, 진동하는 스트링에는 정상파가 발생한다. 정상파는 또한 음파가 관 끝에서 반사될 때도 발생한다.

스트링에 발생한 정상파에는 마디-스트링이 움직이지 않는 지점-과 배-스트링이 위아래로 최대의 진폭으로 진동하는 지점-이 있다. 비슷하게, 정상 음파에는 변위 마디-공기가 진동하지 않는 지점-과 변위 배-공기 진동의 진폭이 최대가 되는 지점-이 있다. 압력 마디와 배 역시 파형 안에 존재한다. 사실, 압력 마디는 변위 배에서 발생하지 않으며, 압력 배는 변위 마디에서 발생하지 않는다. 이것은 압력 배를 서로  $180^\circ$  다른 위상에서 진동하는 두 변위 배 사이에 위치한 압력 배로 생각하면 이해할 수 있다. 두 변위 배에 있던 공기가 서로를 향해 이동하면 압력 배의 압력은 최대가 된다. 반대로 두 변위 배에 있던 공기가 나누어 져 이동하면 압력은 최소가 된다.

음파의 반사는 열린 관 끝과 닫힌 관 끝 모두에서 일어난다. 관의 한쪽 끝이 닫혀있으면 공기는 갈 곳이 없게 되고, 그 결과 닫힌 끝에는 변위 마디(압력 배)가 존재하게 된다. 관 끝이 열려있으면 압력은 실내의 압력과 거의 비슷하게 유지되고, 그 결과 열린 관 끝에는 압력 마디(변위 배)가 존재하게 된다.

### 공명

위에서 설명한 것과 같이, 정상파는 파동이 관 끝에서 반사되고 되돌아오는 파동이 원래의 파동을 간섭할 때 발생한다. 그러나 음파는 실제로 관의 양 끝 사이에서 수없이 앞뒤로 반사되고, 이 모든 다중 반사는 서로를 간섭한다. 일반적으로, 복합적으로 반사된 파동들은 모두 같은 위상이 되지 않고, 파동 패턴 중 진폭은 최소가 된다. 그러나 일정한 진동 주파수에서는 반사된 모든 파동들이 같은 위상이 되어 진폭이 매우 큰 정상파를 발생시킨다. 이러한 주파수를 **공명** 주파수라 한다.

실험 1에서는 관의 길이와 공명이 발생하는 주파수의 관계를 조사할 것이다. 또한 실험 1에서는 주파수보다는 오히려, 파동 패턴 중 파장의 관점에서 볼 때 공명의 조건을 훨씬 더 쉽게 이해할 수 있다는 것을 보여줄 것이다. 공명 상태 역시 관 끝이 열려있으나,



닫혀있느냐에 따라 달라진다. 열린 관의 경우(관의 양 끝이 모두 열려있는 경우), 공명은 파장( $\lambda$ )이 다음의 조건을 만족할 때 발생한다:

$$L = n\lambda/2, n = 1, 2, 3, 4, \dots$$

여기서  $L$  은 관의 길이이다.

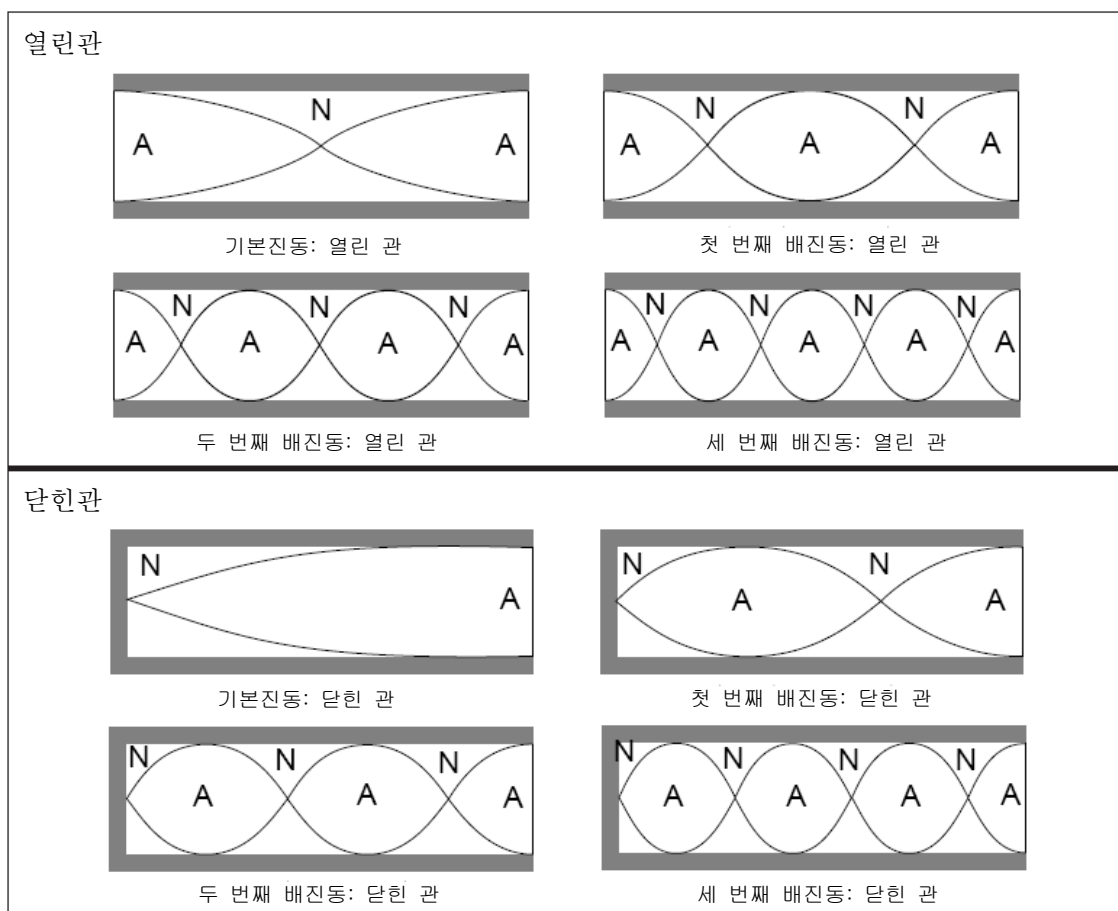
이러한 파장들은 파동 패턴 중 압력 마디(변위 배)가 자연적으로 관의 각 끝에 존재하는 정상파 패턴을 발생시킨다. 공명 상태의 특성을 기술하는 또 다른 방법은 반파장의 정수(integral number of half wavelength)가 관의 양 끝 사이에서 맞아 떨어진다는 것이다.

닫힌 관의 경우(관행에 따라, 닫힌 관은 한쪽 끝은 열려있고 다른 쪽 끝은 닫힌 관이다), 공명은 파장( $\lambda$ )이 다음의 조건을 만족시킬 때 발생한다:

$$L = n\lambda/4, n = 1, 3, 5, 7, 9, \dots$$

이러한 파장들은 열린 관 끝에는 자연적으로 압력 마디(변위 배)가, 닫힌 관 끝에는 자연적으로 압력 배(변위 마디)가 발생하는 정상파의 패턴을 발생시킨다. 열린 관의 경우에서와 같이, 각각의 연속된  $n$  값은 하나 이상의 반파장이 관의 양 끝 사이에서 맞아떨어지는 상태를 나타낸다.

▶ 주의: 아래의 그림에는 열린 관과 닫힌 관의 처음 4개의 공명상태가 제시되어있다. 첫 번째 공명 상태( $n = 1$ )를 기본진동(fundamental)이라 한다. 연속하는 공명 상태는 배진동(overtone)이라고 한다. 각각의 경우에 표시된 것들은 상대 변위이다.



**공명상태: 열린 관과 닫힌 관**

위에 제시된 관 내의 공명에 대한 공식과 그림들은 단지 대략적인 것일 뿐이며, 그 가장 큰 이유는 관 끝에서의(특히 열린 관 끝에서의) 파동의 운동은 부분적으로 관의 직경과 파동의 주파수와 같은 요소에 좌우되기 때문이다. 관의 끝에는 정확한 마디와 배가 존재하지 않는다. 마이크를 사용하여 관 끝에서의 파동의 운동을 조사하는 것은 유용한 실험이 될 수 있다. 다음의 실험식들은 관 내 정상파에 대한 공명 조건들을 다소나마 정확하게 기술하고 있다.

**열린 관의 경우:**

$$L + 0.8d = n\lambda/2, \quad n = 1, 2, 3, 4, \dots$$

여기서  $L$ 은 관의 길이,  $d$ 는 직경이다.

**닫힌 관의 경우:**

$$L + 0.4d = n\lambda/4, \quad n = 1, 3, 5, 7, 9, \dots$$

여기서  $L$ 은 관의 길이,  $d$ 는 직경이다.

▶주의: 관 내의 파형을 조사하기 위해서 마이크를 사용할 때에는 마이크가 압력변환기라는 것을 알고 있어야 한다. 따라서 최대 신호는 압력 배(변위 마디)를 나타내고, 최소 신호는 압력 마디(변위 배)를 나타낸다.

▶주의: 다음의 4가지 실험을 하려면 WA-9612 기주공명실험장치와 32  $\Omega$ , 0.1 W의 스피커를 작동시킬 수 있는 함수 발생기(PASCO PI-9587(PASCO PI-9587C 디지털 함수 발생기 같은 함수 발생기)가 필요하다. 함수발생기를 스피커에 연결하려면 바나나플러그 접속와이어도 필요하다. 오실로스코프는 모든 실험에 권장되며, 실험 4를 할 때는 오실로스코프(PASCO SB-9591 학생용 오실로스코프 같은 오실로스코프)가 꼭 있어야 한다. 주파수 출력이 정확하게 표시되지 않는 함수 발생기를 사용하는 경우에는 네 실험 모두 주파수 카운터(SB-9599A 만능 디지털 미터 같은 주파수 카운터)가 필요하다.

## 실험 1: 관의 공명주파수

### 필요한 장비:

- PASCO 기주공명실험장치
- 함수 발생기
- 주파수 카운터(함수발생기에 주파수가 정확하게 표시되지 않는 경우)
- 오실로스코프(권장되기는 하나 반드시 필요하지는 않음)

### 서론

스피커가 관 가까이에서 진동할 때, 관은 스피커에서 나온 소리를 증폭시키는 특정 주파수가 존재한다. 이러한 주파수를 공명주파수라 하며, 이 주파수에서 관의 크기가 스피커와 관 사이의 에너지 전달이 최대가 될 때 발생한다.

### 실험방법

① 그림 1.1에 보이는 것과 같이, 기주공명실험장치, 오실로스코프, 함수 발생기를 장치한다. 오실로스코프를 켜다. 오실로스코프의 주사속도는 약 5 ms/div, 채널 1의 출력률은 약 5 mV/div로 설정한다. 증폭기와 함수 발생기를 켜다. 함수 발생기의 출력 주파수를 약 100 Hz로 설정한다. 스피커에서 나는 소리가 뚜렷하게 들릴 때까지 함수발생기의 진폭을 조절한다. 오실로스코프를 사용하는 경우에는 스피커출력을 시작시킨다.

▶경고: 스피커를 과도하게 작동시키면 스피커가 파손될 수 있다. 스피커에서 나는 소리는 뚜렷하게 들려야 하나 지나치게 커서는 안 된다. 다수의 신호 발생기들은 주파수가 증가할수록 훨씬 더 효율적으로 되어 출력을 증가시키게 되므로 주파수를 증가시킬 때에는 진폭을 감소시켜야 할 수도 있다는 것에 주의한다.

② 주파수를 천천히 증가시키고 주의해서 듣는다. 일반적으로, 함수 발생기와 스피커는 고 주파수에서 훨씬 더 효율적이기 때문에 주파수를 증가시키면 소리는 더 커지게 될 것이다. 그렇다 하더라도, 주파수를 조금씩 증가시키면서 소음레벨이 상대적으로 최대가 되는 주파수-소음레벨이 약간 감소하는 주파수-에 귀를 기울인다. 상대적으로 최대가 되는 주파수는 관 내의 공명 모드를 나타낸다. 주파수를 조심스럽게 조절하여 주파수가 상대적으로 최대가 되는 최저주파수를 찾는다. (또한 오실로스코프의 트레이스를 관찰하는 방법으로도 상대적으로 최대가 되는 주파수를 찾을 수 있다. 신호가 최대 높이에 있으면 이미 공명 주파수에 도달한 것이다.) 표 1.1에다 최저 공명주파수의 값을  $n_0$ 으로 기록한다.

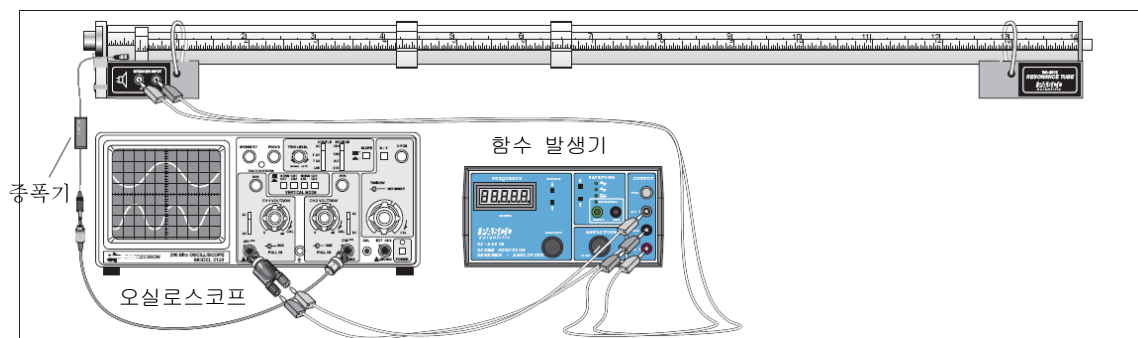


그림 1.1 장비 셋업

- ③ 새로운 공명주파수를 찾을 때까지 주파수를 천천히 올린다. 다시 주파수를 측정하고 기록한다.
- ④ 계속하여 더 높은 공명주파수를 찾는다. 최소한 5개의 공명주파수를 찾도록 한다.
- ⑤ 이제 관의 한쪽 끝을 닫는다. 편리한 물체 위에 막대를 받치고 관 끝에 피스톤을 넣거나 책 같은 물체를 관 끝에 갖다 대면 관의 한쪽 끝을 닫을 수 있다.
- ⑥ 닫힌 관에 대해서 2-4 단계를 반복하고, 표 1.2에 표시도수를 기록한다.

표 1.1 열린 관의 공명 주파수

주파수 $\nu$	$\nu/\nu_0$
$\nu_0 =$	

표 1.2 닫힌 관의 공명 주파수

주파수 $\nu$	$\nu/\nu_0$
$\nu_0 =$	

### 분석

각각의 관 구성(열린 관과 닫힌 관)에 대하여, 찾아낼 수 있었던 최저공명주파수( $\nu_0$ )로 각각의 공명주파수( $\nu$ )를 나눈다. 계산 결과는 일련의 정수가 되어야 한다. 각각의 관 구성에 구해진 일련의 정수들을 기록한다. 계산 결과가 일련의 정수가 아니라면, 관에 알맞은 최저공명주파수를 찾아내지 못한 것일 수도 있다. 그렇다면, 계산 결과를 이용해서 어떤 것이 최저공명주파수였었는지를 결정해야 한다.

### 질문

닫힌 관과 열린 관에서 산정한 수열은 동일한가? 관 구성이 어떠할 때 일련의 연속정수들이 구해지는가? 정상파 패턴에 대해 이미 공부하였다면, 각각의 관 구성에서

일어나는 정상파 패턴의 유형이라는 점에서 결과를 설명해보라. 관의 닫힌 끝에는 마디가 존재하는가, 배가 존재하는가? 관의 열린 끝에는 마디가 존재하는가, 배가 존재하는가?

## 실험 2: 관 내의 정상파

필요한 장비:

- PASCO 기주공명실험장치
- 함수 발생기
- 주파수 카운터(함수 발생기에 주파수가 정확하게 표시되지 않는 경우)
- 오실로스코프(관장되나, 반드시 필요하지는 않음)

서론

관 아래로 전달되는 음파는 관의 각 끝에서부터 앞뒤로 반사되고, 모든 파동 즉, 원래의 파동과 반사파동은 서로를 간섭한다. 관의 길이와 음파의 파장에 대해 동일한 방향으로 이동하는 모든 파동들의 위상이 동일하게 되면, 정상파 패턴이 형성된다. 이것은 관의 공명모드로 알려져 있으며, 공명이 일어날 때의 주파수를 공명주파수라 한다. 이 실험에서는 기주공명실험장치 내부에 정상파를 일으킨 다음, 마이크를 이용해 정상파의 특성을 확인할 것이다.

실험방법

- ① 그림 2.1에 보이는 것과 같이 기주공명실험장치, 오실로스코프, 함수발생기를 장치한다. 오실로스코프를 켜다. 주사속도는 5 ms/div, 채널 1의 출력률은 약 5 mV/div로 설정한다.

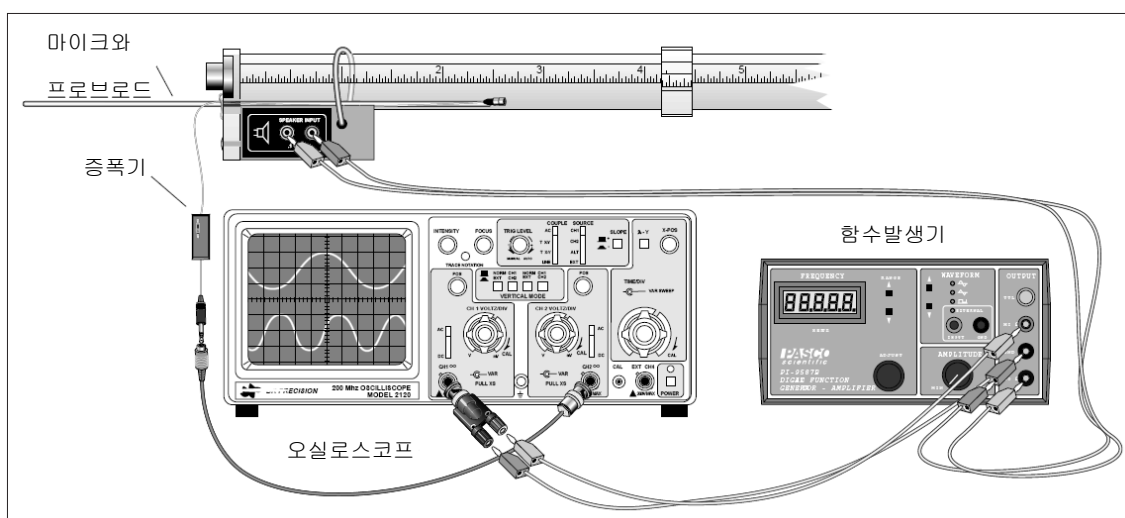


그림 2.1 장비 셋업

증폭기와 함수발생기를 켜다. 함수발생기의 출력 주파수를 약 100 Hz로 설정한다. 스피커에서 나는 소리가 뚜렷하게 들릴 때까지 함수발생기의 진폭을 조절한다. 오실로스코프를 사용하는 경우에는 스피커 출력을 시작시킨다.

▶**경고:** 스피커를 과도하게 작동시키면 스피커가 파손될 수 있다. 스피커에서 나는 소리는 뚜렷하게 들려야 하나 지나치게 커서는 안 된다. 다수의 신호 발생기들은 주파수가 증가할수록 훨씬 더 효율적으로 되어 출력을 증가시키게 되므로 주파수를 증가시킬 때에는 진폭을 감소시켜야 할 수도 있다는 것에 주의한다.

② 천천히 주파수를 증가시키고 주의하여 듣는다. 일반적으로, 함수 발생기와 스피커는 더 높은 주파수에서 더 효율적이기 때문에 주파수가 증가할수록 소리는 더 커지게 된다. 그렇다 하더라도, 주파수를 조금씩 증가시키면서 소음레벨이 상대적으로 최대가 되는 주파수-소음레벨이 약간 감소하는 주파수-에 귀를 기울인다. 상대적으로 최대가 되는 주파수는 관 내의 공명 모드를 나타낸다. 주파수를 조심스럽게 조절하여 주파수가 상대적으로 최대가 되는 최저주파수를 찾는다. (또한 오실로스코프의 트레이스를 관찰하는 방법으로도 상대적으로 최대가 되는 주파수를 찾을 수 있다. 신호의 높이가 상대적으로 최대이면, 공명주파수를 찾은 것이다.)

▶**주의:** 낮은 주파수(0-300 Hz)에서 공명주파수를 찾는 것은 어려울 수 있다. 낮은 주파수에서 공명주파수를 찾는 것이 곤란하면, 더 높은 주파수의 공명모드를 먼저 찾아본 다음, 관 내의 공명모드에 대한 지식을 이용해 더 낮은 공명주파수를 산정한다. 반드시 해당 주파수에서 공명이 실제로 일어나는지 확인하여야 한다.

③ 프로브 가로대 끝에 마이크를 장치한 다음, 스피커/마이크 받침대에 있는 구멍을 통해 관 안으로 집어넣는다. 기다란 관 아래로 마이크를 이동시키면서 오실로스코프의 신호가 최대가 되는 지점과 최소가 되는 지점에 주목한다. 이들 지점을 표2.1에 기록한다. 줄이 너무 짧아서 프로브를 관 아래로 완전히 이동시킬 수는 없을 것이다. 그러나 프로브를 관의 반대쪽 끝 근처로 이동시켜 관의 다른 쪽 끝을 시험할 수는 있다. 관의 열린 끝 가까이에 발생한 파동의 특성에 특히 유의한다.

④ 최소한 서로 다른 5개의 공명주파수에 대하여 위의 절차를 반복하고 그 결과를 별개의 종이에 기록한다.

⑤ 그림 2.2에 보이는 것과 같이, 마이크가 스피커의 끝부분에서부터 시작해서 도달할 수 있는 최대위치에 피스톤이 도달할 때까지 피스톤을 관 안쪽으로 끼워 넣는다.

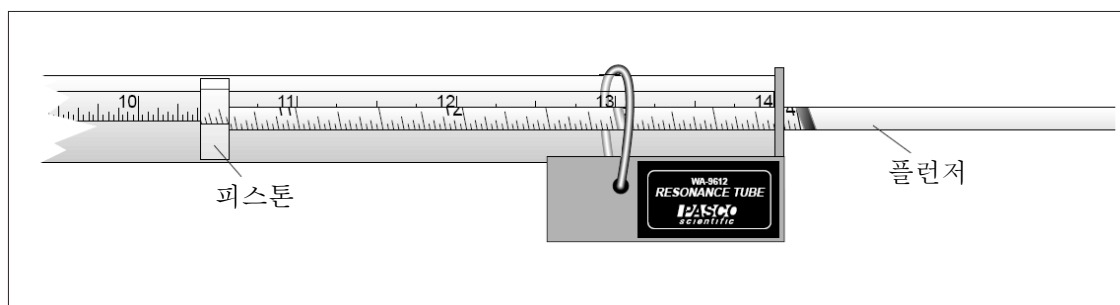


그림 2.2 플런저 사용하기

⑥ 이러한 새로운 관 구성에 알맞은 공명주파수를 찾는다. 마이크를 사용해 이러한 닫힌 관 구성에서의 최대값과 최저값의 위치를 찾아내 표 2.2에 결과를 기록한다. 서로 다른 몇몇 주파수에 대해 절차를 반복한다.

### 분석

기록해놓은 데이터를 이용해 열린 관과 닫힌 관에 적용한 각각의 주파수에서 기다란 관을 따라서 발생하는 파동의 운동을 간략하게 그린다.

사용하고 있는 마이크는 압력에 민감하다. 따라서 최대값들은 압력이 최대가 되는 지점이며, 최소값들은 압력이 최저가 되는 지점들이다. 간략하게 그린 그림에서, 최대 변위 지점과 최소 변위 지점이 위치한 곳을 표시한다.

최소한 2회 실험하여 파장을 측정한다. 각각의 구성에서 사용하였던 음파의 주파수를 고려하여, 관 내의 음속을 계산한다. 계산된 음속은 일반적으로 인정되는 값인  $331.5 \text{ m/sec} + .607 T$ 와 얼마나 일치하는가? 여기서  $T$ 는 섭씨온도이다.

측정값을 기초로 열린 관 끝에 발생한 파동운동의 특징에 대해 기술하라. 또한 피스톤의 결면과 같이 단단한 장애물이 있을 때 발생하는 파동의 특징에 대해 기술하라.



## 표 2.1 열린 관

공명 주파수:

마이크의 위치	
최대값	최소값

## 표 2.2 닫힌 관

공명 주파수:

마이크의 위치	
최대값	최소값

## 실험 3: 관의 길이와 공명 모드

필요한 장비:

- PASCO 기주공명실험장치
- 함수 발생기
- 주파수 카운터(함수발생기에 주파수가 정확하게 표시되지 않는 경우)
- 오실로스코프(권장되나, 반드시 필요하지는 않음)

서론

관의 길이가 일정한 경우, 공명주파수-관 내에 정상파를 발생시키는 주파수-는 다양하다. 마찬가지로 주파수가 일정한 경우, 정상파를 발생시키는 관의 길이도 다양하다. 이 실험에서는 설정된 주파수와 함께 공명하는 연속된 관의 길이들을 조사할 것이다.

실험방법

① 그림 3.1에 보이는 것과 같이, 기주공명실험장치, 오실로스코프, 함수 발생기를 장치한다. 피스톤을 관 끝과 가장 가까운 위치로 이동시킨다. 신호발생기를 약 800 Hz로 설정하고 스피커에서 나는 소리가 뚜렷하게 들릴 때까지 진폭을 증가시킨다. 스피커의 소리가 뚜렷하게 들리는 주파수를 기록한다. 오실로스코프를 사용하는 경우에는 스피커출력을 시작시킨다.

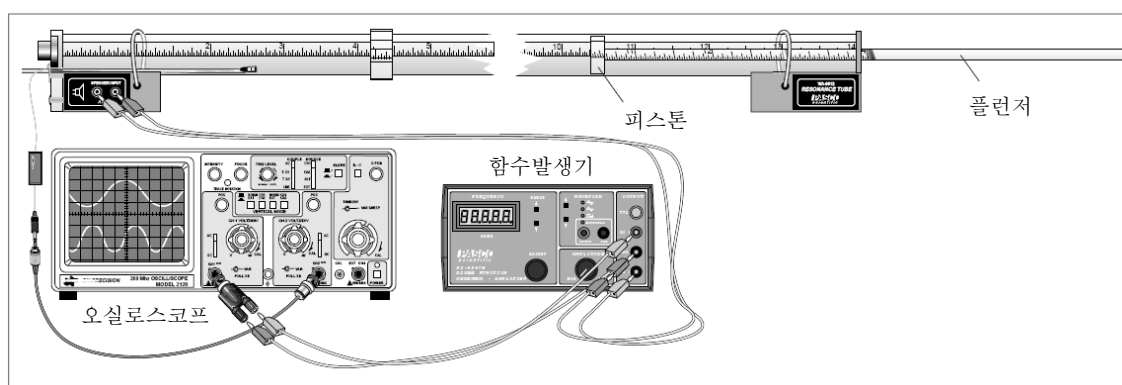


그림 3.1 장비 셋업

▶**경고:** 스피커를 과도하게 작동시키면 스피커가 파손될 수 있다. 스피커에서 나는 소리는 뚜렷하게 들려야 하나 지나치게 커서는 안 된다. 다수의 신호 발생기들은 주파수가 증가할수록 훨씬 더 효율적으로 되어 출력을 증가시키게 되므로 주파수를 증가시킬 때에는 진폭을 감소시켜야 할 수도 있다는 것에 주의한다.

② 관에 의해 증폭되는 스피커에서 소리가 날 때까지 관 안쪽으로 피스톤을 천천히 밀어 넣는다. 스피커에서 소리가 나는 것은 관 내에 정상파가 발생하였다는 것을 나타낸다. 가장 큰 소리가 나는 것뿐만 아니라 오실로스코프의 화면에 가장 큰 신호가 표시되는 지점을 찾을 때까지 피스톤의 위치를 조심스럽게 조절한다. 이 위치를 기록한다.

③ 정상파가 발생하는 새로운 위치에 도달할 때까지 피스톤을 계속하여 관 안쪽으로 이동시킨다. 새로 도달한 위치를 기록한다. 관을 따라서 정상파를 발생시키는 피스톤의 위치를 모두 찾아낼 때까지 계속하여 피스톤을 안쪽으로 이동시킨다.

④ 교사가 지도하는 대로 서로 다른 다양한 주파수에 대하여 위의 절차를 반복한다.

### 분석

기록해놓은 데이터를 이용해, 피스톤이 스피커에서 가장 먼 위치에 있을 때 기다란 관을 따라서 발생하는 파동의 운동을 간략하게 그린다. 정상파를 발생시킨 연속적인 피스톤의 위치는 약도와 어떻게 관련 지을 수 있는가? 뚜렷한 마디와 배의 간격은  $\lambda = V/v$  를 이용해 계산한 음파의 파장과 일치하는가? 여기서  $V$ 는 음속이다.

표 3.1 닫힌 관의 공명

주파수	주파수	주파수	주파수
피스톤의 위치	피스톤의 위치	피스톤의 위치	피스톤의 위치

## 실험 4: 관 내의 음속

### 필요한 장비:

- PASCO 기주공명실험장치
- 함수 발생기
- 오실로스코프

### 서론

정상파의 패턴을 근거로 관 내의 음속을 측정할 수 있다. 정상파를 발생시킨 다음, 정상파의 패턴을 근거로 소리의 파장을 측정한다. 그리고 나서 파장에 주파수를 곱하면 파동의 속도( $V = \lambda n$ )를 구할 수 있다.

그러나 보다 더 직접적인 방법으로도 음속을 측정할 수 있다. 이 실험에서는 소리의 펄스가 관 아래쪽으로 전달되었다가 끝에서 다시 반사되는 시간을 측정하는 방법으로 관 내의 음속을 측정할 것이다.

### 실험방법

① 그림 4.1에 보이는 것과 같이, 기주공명실험장치, 오실로스코프, 함수 발생기를 장치한다. 피스톤을 관 끝 가까이로 이동시킨다. 신호발생기를 약 10 Hz의 구형파로 설정한 다음, 스피커에서 딸깍하는 소리가 뚜렷하게 날 때까지 진폭을 증가시킨다. 오실로스코프는 신호 발생기로부터의 출력 혹은 발생기의 트리거출력으로 시동되어야 한다. 대략 신호발생기의 출력 주파수와 동일한 주파수에서 관찰하였을 때, 화면은 그림 4.2의 도표와 비슷해 보여야 한다.

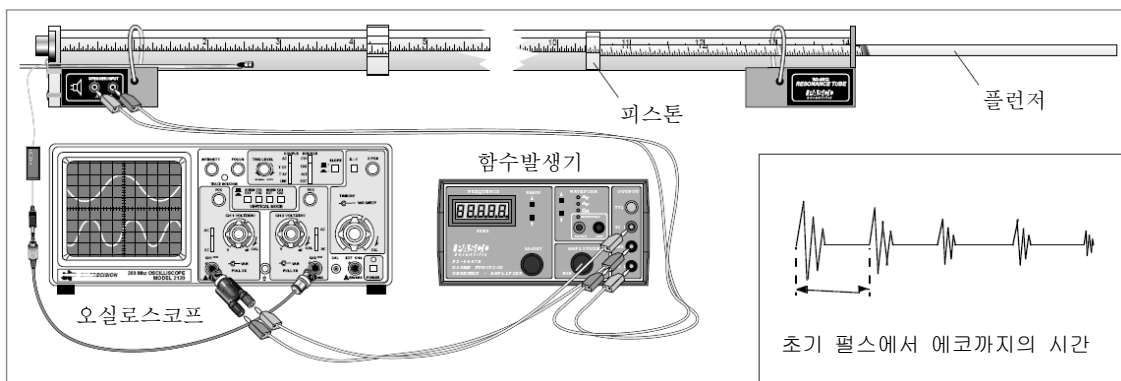


그림 4.1 장비 셋업

그림 4.2 장비 셋업

▶경고: 스피커를 과도하게 작동시키면 스피커가 파손될 수 있다. 스피커에서 나는 소리는

뚜렷하게 들려야 하나 지나치게 커서는 안 된다. 다수의 신호 발생기들은 주파수가 증가할수록 훨씬 더 효율적으로 되어 출력을 증가시키게 되므로 주파수를 증가시킬 때에는 진폭을 감소시켜야 할 수도 있다는 것에 주의한다.

② 구형파의 한 부분을 따라서 이동하는 펄스의 세부사항이 보다 더 뚜렷하게 보일 때까지 오실로스코프의 주사속도를 증가시킨다. 구형파의 갑작스런 전압 증가로 인해 스피커가 처음으로 울릴 때까지 발생한 일련의 파동들을 잘 살펴보아야 한다. 이러한 파동들이 관찰되면 곧 바로 관의 다른 끝에 있는 피스톤의 끝면으로부터 소리가 반사되어 되돌아오고 있음을 나타내는 비슷한 일련의 파동들이 잇따를 것이다. 주사속도가 더 빠른 오실로스코프의 트레이스는 그림 4.2의 아래쪽 도표와 비슷해 보여야 한다.

③ 화면에서 초기 펄스에서부터 첫 번째 에코까지의 거리가 얼마나 되는지를 측정한다. 측정 값을 표 4.1에 기록한다. 주사속도의 설정 값(오실로스코프에서 설정한 초/cm)과 스피커에서 피스톤까지의 거리도 기록하여야 한다.

④ 피스톤을 새로운 위치로 이동시킨다. 첫 번째 에코 역시 이동하게 되는 것에 주의한다. 새로운 위치에서, 스피커에서 피스톤의 끝면까지의 거리, 최초 펄스에서 에코까지의 거리, 주사속도를 기록한다.

⑤ 최소한 5개의 데이터세트가 모일 때까지 계속하여 피스톤의 위치를 이동시킨다. ⑥ 이제 피스톤을 제거하고 열린 관에 대한 실험을 반복한다.

▶ 이제 열린 관의 끝부분 근처까지 피스톤을 이동시킨다. 음파가 스피커에서 마이크까지 이동하는데 걸린 시간을 측정한다.

## 분석

기록해 놓은 데이터를 이용해 닫힌 관 내의 음속을 계산한다. 열린 관 내의 음속이 닫힌 관 내의 음속과 같다고 가정하면(유리한 가정), 열린 관에 적합한 관의 길이는 얼마로 보이는가? 이 질문에 대한 답을 실제 관의 길이와 비교하면 어떠한가? 이제 막 비교한 것에 대해 논의하라.

관 내의 음속이 아닌, 공기 중의 음속을 측정하려면 실험을 어떻게 설정하여야 하는지에 대해 기술하라.

표 4.1 닫힌 관 내의 음속

관의 길이	스코프 화면 상의 거리	주사속도	음속

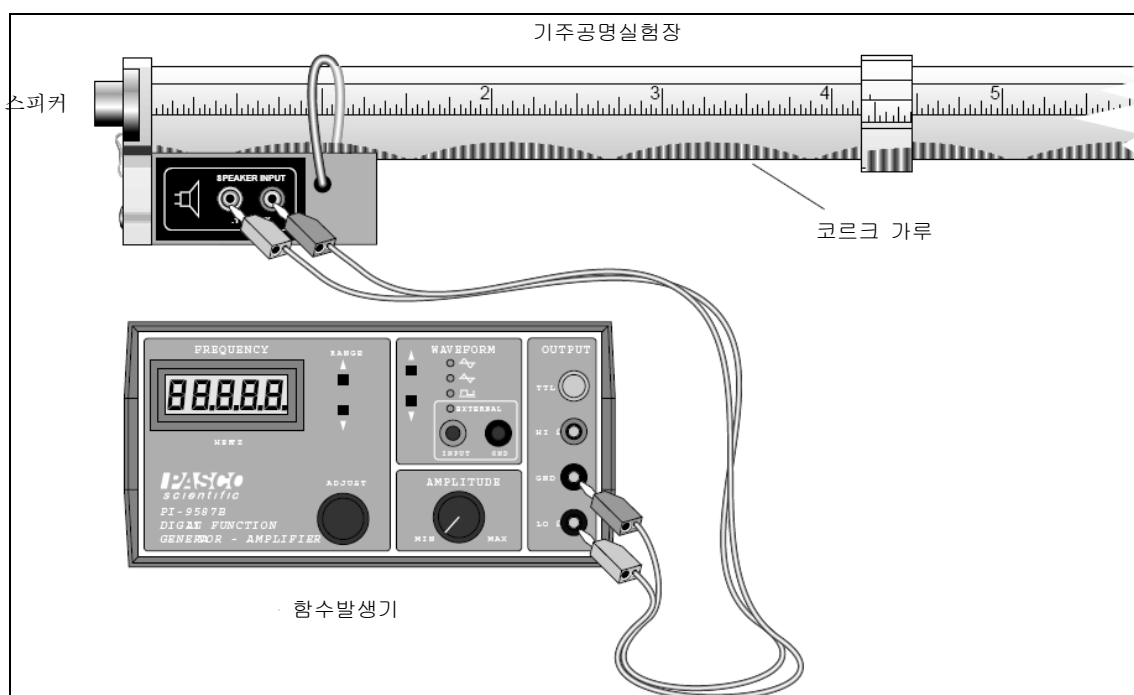
표 4.2 열린 관 내의 음속

관의 길이	스코프 화면 상의 거리	주사속도	음속

## 제 안 된 실 험

필요한 장비:

- PASCO 기주공명실험장치
- 코르크 가루
- 스피커
- 함수 발생기
- 기주공명실험장치용 플런저



### 서론

PASCO WA-9612 기주공명실험장치를 조금만 변형하면 쿤트 관(Kundt's tube)으로 사용할 수 있다. 쿤트 관은 교실에서의 실험 혹은 소그룹의 학생들의 실험을 매우 효과적으로 만들어 준다.

### 실험방법

- ① 기주공명실험장치의 바닥을 따라서 소량의 코르크 가루를 고르게 뿌린다. 관의 측면에서 약간 위쪽에 코르크가루가 오도록 관을 약간만 회전시킨다.
- ② 그림에 보이는 것과 같이, 관 끝에 스피커를 놓는다. 관 내에 정상파가 발생할 때까지 진폭과 주파수를 조절한다. (관 내에 정상파가 발생하면 소리의 진폭이 두드러지게

증가하게 된다.) 이때, 변위 배 부분의 코르크 가루들은 빠르게 움직이는데 반해 마디 부분의 코르크가루들은 움직이지 않는다.

③ 이제 주파수를 다른 정상파 주파수로 조절하거나 한쪽 끝에 플런저를 끼워 넣으면 닫힌 관 내에 발생한 정상파 대 열린 관 내에 발생한 정상파의 차이를 관찰할 수 있다.



## 제 안 된 연 구 주 제

다음은 기주공명실험장치를 이용해 할 수 있는 추가 실험에 대한 제안들이다.

- ① 똑 같은 물질로 만들어졌지만 직경은 서로 다른 관들을 준비한다. 관의 직경과 관 내 음속의 관계를 조사한다.
- ② 실험 4에 적용한 실험방법과 똑 같은 방법으로 관 외부의 음속을 측정한다.(관 외부의 음속을 측정하는 것은 대단히 까다로울 수 있다. 측정을 방해할 수 있는 반사면을 제거하는 것은 특히 중요하다.) 관 외부의 속도와 관 내의 속도를 비교하면 어떠한가?
- ③ 관을 밀봉한 다음, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> 혹은 O<sub>2</sub>와 같은 기체들을 채워 넣는다. 다양한 기체들이 채워져 있을 때의 음속을 측정한다.
- ④ 관의 한쪽 끝을 열고 관으로 공기를 흐르게 하여 관 내의 음속을 계산한다. 스피커 쪽으로 이동하거나 스피커에서 멀어지는 공기의 흐름을 이용하면 관으로 공기를 흐르게 할 수 있다. 소리가 공기의 흐름과 같은 방향으로 이동하거나 공기의 흐름과 반대로 이동할 때의 음속은 직접적으로 마이컬슨-몰리의 실험에 대한 논의를 끌어낸다.
- ⑤ 관의 측면에 있는 구멍을 이용해 악기에서 손가락 마개가 하는 기능을 조사한다. 열린 구멍 혹은 닫힌 구멍은 기본 주파수에 어떤 영향을 미치는가? 구멍이 정상파 패턴에서 마디에 있느냐, 배에 있느냐에 따라 차이가 있는가?

## 교사용 가이드

### 실험 1: 관의 공명주파수

#### 실험방법에 대한 주석

⑥ 피스톤으로 맨 끝을 닫은 관(가능하면 닫힌 관 중 가장 긴 관)의 기본주파수는 약 95Hz이다. 그렇게 낮은 주파수에서는 공명을 확인하는 것이 어렵기 때문에, 실험자는 최소한 70cm로 표시된 지점까지 확실하게 피스톤을 끼워 넣고자 할 수도 있다.

#### 질문에 대한 주석

열린 관의 수열(1,2,3,4……)에는 연속된 정수를 포함된다. 닫힌 관의 수열(1,3,5,7……)에는 홀수인 정수가 포함된다. 이러한 수열은  $n$ 값의 수열이다: 이론부분을 참조한다.

#### 분석에 대한 주석

##### 열린 관 닫힌 관

$v$	$v/v_0$	$v$	$v/v_0$
185	1.00	94	1.00
369	1.99	282	3.00
555	3.00	473	5.03
740	4.00	663	7.05
918	4.96	852	9.06
1102	5.96	1042	11.09
1271	6.87	1230	13.09
1369	7.40	1434	15.26
1676	9.06	1626	17.30
1870	10.11	1812	19.28
2056	11.11	2006	21.34

이론상의 공명주파수에서 발생한 공명은 아니지만, 공명처럼 보이는 데이터포인트가 있을 것이다. (예를 들면, 위에 제시된 “열린 관”에 대한 데이터 중에서 이탤릭체로 된 포인트들) 그러나 대체로, 데이터들은 이론에 아주 가까울 것이다.

## 실험 2: 관 내에 발생한 정상파

### 실험방법에 대한 주석

- ①② 실험 1을 이미 마쳤다면, 실험 1에서 알게 된 열린 관의 공명 주파수를 이용한다.  
 ③ 열린 관 끝 가까이에 있는 마디 포인트들은 실제로는 끝부분 너머에, 다시 말해 관의 바깥쪽에 위치할 수도 있다.

### 분석에 대한 주석

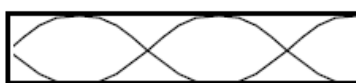
- ①② 마이크가 변위 편차보다는 오히려 압력 편차를 탐지하는 경우를 제외하고, 파동의 운동 패턴은 사용설명서의 “이론”부분에 제시된 도표와 유사할 것이다.  
 이러한 이유 때문에, 정상파의 패턴은 제시된 패턴에서  $90^\circ$  바뀌었을 것이다. 사용설명서의 이론 부분에는 열린 관과 닫힌 관의 변위에 대한 그림이 제시되어있다; 단, 마이크의 경우 압력에 대한 그림을 볼 수 있다.  
 ③ 관 내의 음파의 속도는 관 외부의 음파의 속도보다 더 크다; 그러나 이 실험의 한계범위 내에서 관 내, 외부의 음파의 속도는 동일할 것이다.  
 ④ 압력파는 피스톤의 끝면에서 반전하지 않고 반사된다. 압력파는 열린 관의 끝에서 반전되어 반사된다.



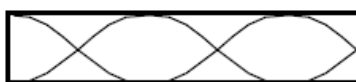
변위에 대한 그림



압력에 대한 그림



변위에 대한 그림



압력에 대한 그림

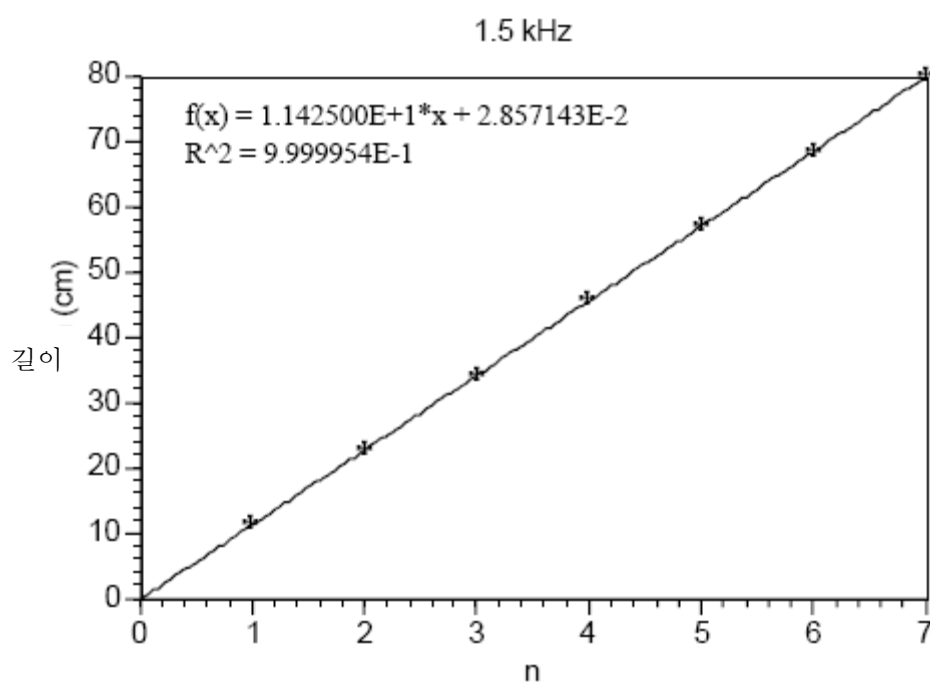
### 실험 3: 관의 길이와 공명모드

#### 분석에 대한 주석

연속된 피스톤의 위치들은 압력 배(변위 마디)의 위치와 상응한다. 이들 위치 사이의 간격은 소리의 파장의 1/2과 같다.

#### 주석

이 방법의 편차를 이용하면 관 내의 음속을 아주 정확하게 측정할 수 있다. 관의 길이를  $n$ 의 함수처럼 좌표에 표시한다. 여기서  $n$ 은 정상파 패턴에 존재하는 배의 수이다(제시된 그래프는 양끝이 닫힌 관에 대한 그래프이다.) 이 직선의 기울기는  $\lambda/2$ 과 같으며, 이 값에 근거하면 속도를 구할 수 있다.



$$v = 342.75 \text{ m/s}$$

$331.5 + 0.607 T = 342.42 \text{ m/s}$ . ( $T = 18^\circ\text{C}$ )의 이론 값을 비교하라.

절편은 관의 “유효길이”와 관계가 있으며, 주파수에 따라 변한다.

## 실험 4: 관 내의 음속

### 실험방법

- ① 오실로스코프에 있는 외부 트리거링(triggering)을 이용할 것을 권장하고 있다. 화면에서 뚜렷하고 일정한 트레이스(trace)를 확보하려면 트리거링의 레벨과 지체(holdoff)를 조절해야 할 것이다.
- ②⑤ 측정값은 335~347 m/s 이었으며, 편차는 주로 에코 사이의 거리를 측정하는 것이 어려움으로 인해 발생하였다. 트레이스가 언제나 일정하고 읽기 쉬운 것은 아니다.

### 분석

- ①  $v \approx 340$  m/s. 더 정밀한 값을 얻으려면, 교사용 지침에 기술되어있는 방법을 실험 3에 적용한다.
- ② 스크랩 lexan조각과 테이프로 코너큐브 반사경을 만들어 이것을 측정할 수 있었다. 그러나 신호는 매우 약하였으며, 1m이하에서는 사실상 소용이 없었다.
- ③ 관 끝이 열려 있으면 반사된 소리의 펄스는 반전될 것이다. 그리고 관 끝이 닫혀있으면 반전되지 않을 것이다. 이것은 -다른 것들 중에서도- 관 내의 음속이 관 외부의 음속보다 더 빠르다는 것을 나타낸다. (이 실험장치로는 이러한 속도의 차이를 실험적으로 증명할 수 없었다.)