

# 03

## 도플러 효과와 속도 측정

**학습 목표** | 도플러 효과를 이해하고 물체의 속도 측정 등 다양한 장치에 이용되는 것을 설명할 수 있다.



박쥐는 초음파를 이용해 장애물이나 먹이의 위치뿐만 아니라 운동 상태까지 파악한다. 초음파를 이용해 물체의 운동 상태를 파악할 수 있는 원리는 무엇일까?

### 도플러 효과

구급차가 가까워질 때와 멀어질 때 관찰자는 구급차의 사이렌 소리를 다르게 듣는다. 이는 파원의 운동 상태가 관찰자가 관측하는 소리의 진동수에 영향을 주기 때문이다.

파원과 관찰자의 상대적 운동에 따라 관찰자가 관측하는 파동의 진동수가 파원의 진동수와 달라지는 현상을 **도플러 효과**라고 한다. 다음 활동을 하면서 파원이나 관찰자가 운동할 때 어떤 차이가 있는지 알아보자.

**\* 파원**  
파동이 처음 만들어지는 지점이다.

- 스마트폰 A와 B를 고정하고 스마트폰 B로 소리의 진동수를 측정한다.
- 스마트폰 B를 고정하고 스마트폰 A를 천천히 움직여 B에서 멀게 하거나 가깝게 하면서 소리의 진동수 변화를 확인한다.
- 스마트폰 A를 고정하고 스마트폰 B를 천천히 움직여 A에서 멀게 하거나 가깝게 하면서 소리의 진동수 변화를 확인한다.
- 과정 3~5**에서 측정한 소리의 진동수를 스마트폰 A에서 발생한 소리의 진동수 1700 Hz와 비교해 표에 기록한다.

구분		진동수 비교
<b>과정 3</b>		
<b>과정 4</b>	A를 B에서 멀게 할 때	
	A를 B에 가깝게 할 때	
<b>과정 5</b>	B를 A에서 멀게 할 때	
	B를 A에 가깝게 할 때	



**▶ 탐구 길잡이**  
실험 순서를 정해 동시에 소리를 발생하지 않도록 하고, 다른 모둠이 실험할 때에는 방해가 되는 소음을 내지 않는다.

### 결과 및 정리

- 측정한 소리의 진동수가 발생한 소리의 진동수보다 큰 경우와 작은 경우는 각각 언제인가?

- 큰 경우: \_\_\_\_\_
- \_\_\_\_\_
- \_\_\_\_\_
- \_\_\_\_\_
- \_\_\_\_\_
- \_\_\_\_\_
- \_\_\_\_\_

- 작은 경우: \_\_\_\_\_
- \_\_\_\_\_
- \_\_\_\_\_
- \_\_\_\_\_
- \_\_\_\_\_
- \_\_\_\_\_
- \_\_\_\_\_

- 파원과 관찰자의 상대 운동과 관측되는 소리의 진동수 변화는 어떤 관계가 있는가?



### 스스로 평가

- | 지식·이해 |** 스마트폰의 운동에 따라 측정되는 소리의 진동수 변화를 설명할 수 있는가? ☆☆☆
- | 과정·기능 |** 스마트폰의 소리 발생 애플리케이션과 소리 측정 애플리케이션 사용법을 익히고 탐구에 활용했는가? ☆☆☆
- | 가치·태도 |** 자연 현상을 과학적으로 관찰, 분석하려는 태도로 탐구에 참여했는가? ☆☆☆

**▶ 탐구 후기**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## 탐구

수학적 사고 활용 / 변인 조작 / 결론 도출



**역할 나누기**  
3~5 명을 한 모둠으로 하고, 역할을 나눠 보자.  
• 실험 수행: \_\_\_\_\_  
• 결과 기록: \_\_\_\_\_

### 스마트폰을 활용하여 도플러 효과 측정하기

- 준비물**
- 스마트폰 2 대
  - 소리 발생 애플리케이션
  - 소리 측정 애플리케이션

**목표**  
스마트폰을 활용해 도플러 효과를 측정할 수 있다.

- 과정**
- 스마트폰 A에는 소리 발생 애플리케이션을 설치하고, 스마트폰 B에는 소리 측정 애플리케이션을 설치한다.
  - 스마트폰 A로 진동수가 1700 Hz 인 소리를 발생시킨다.



▶ 탐구 능력 | 문제 해결 능력

진폭, 진동수, 파형으로 표현하는 소리의 특성을 배웠다.

**\* 파면**

파면은 파동에서 동일한 위상을 갖는 점들의 집합으로 파동의 진행 방향에 수직하다.

104 쪽 탐구에서 살펴본 것처럼 관찰자가 정지해 있을 때, 파원이 관찰자를 향해 운동하면 관찰자가 듣는 소리의 진동수가 증가하고, 파원이 관찰자로부터 멀어지면 듣는 소리의 진동수가 감소한다. 마찬가지로 파원이 정지해 있고 관찰자가 운동할 때에도 듣는 소리의 진동수가 달라진다.

그림 III-15와 같이 사이렌 소리를 내는 정지한 구급차와 정지한 관찰자의 경우를 살펴보자. 먼저 정지 상태의 파원 S는 진동수가  $f$ , 파장이  $\lambda$ 이고 진행 속력이  $v$ 인 파동을 발생한다. 이때 정지한 관찰자에게는  $\frac{1}{f} = \frac{\lambda}{v}$  초마다 1 번씩 파면이 도달한다. 따라서 관찰자가 측정하는 파동의 주기는  $T = \frac{\lambda}{v} = \frac{1}{f}$  이고, 진동수는  $f_0 = f$  이다. 즉, 파원과 관찰자가 모두 정지해 있을 때는 파원에서 발생한 파동의 진동수와 관찰자가 측정하는 파동의 진동수가 같다. 그러나 구급차가 관찰자를 향해 달려올 때와 관찰자로부터 멀어질 때는 소리가 다르게 들린다. 또 관찰자가 운동할 때에도 소리가 다르게 들린다.

그림 III-15 정지한 파원에서 퍼져 나오는 파동



**스스로 확인**

- 1 관찰자와 파원의 상대적 운동에 따라 관찰자가 측정하는 파동의 진동수가 달라지는 현상을 ( ) 효과라고 한다.
- 2 파원과 관찰자가 정지해 있을 때, 관찰자가 듣는 소리의 진동수는 파원에서 발생하는 소리의 진동수와 같다. ( O, X )

**파원의 운동과 도플러 효과**

그림 III-16은 진동수가  $f$ , 주기가  $T$ 인 소리를 내는 파원이 정지한 관찰자 A, B 사이에서 속력  $v_s$ 로 운동하며 시간  $t=0$ 일 때 점  $S_1$ 을,  $t=T$ 일 때 점  $S_2$ 를 통과하는 모습을 나타낸 것이다.

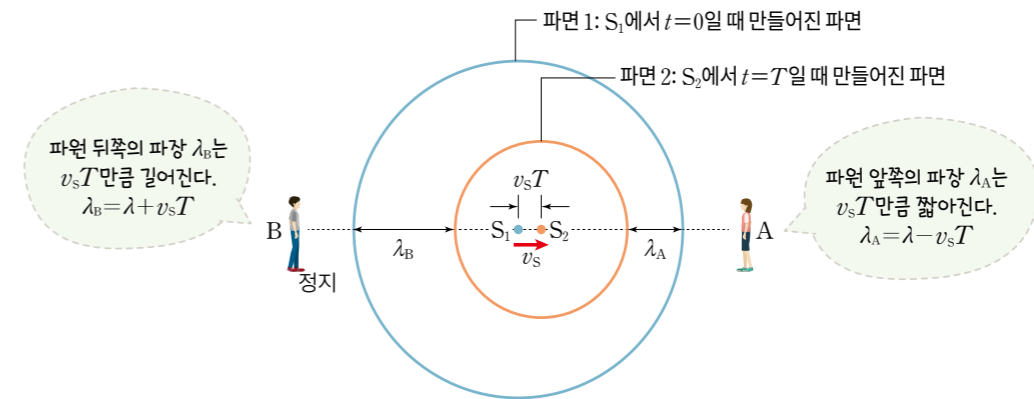


그림 III-16 움직이는 파원에서 퍼져 나오는 파동

소리의 속력을  $v$ 라고 하면 파원이 내는 소리의 주기는  $T = \frac{1}{f}$  이고 파장은  $\lambda = \frac{v}{f}$  이다. 이때 관찰자 A, B가 측정하는 소리의 속력은  $v$ 로 같다.

$S_1$ 에서 출발한 파면 1이 이동한 시간을  $t_1$ 이라고 하면  $S_2$ 에서 출발한 파면 2가 이동한 시간은  $t_1 - T$ 이다. 파면 1은 중심이  $S_1$ 이고 반지름이  $vt_1$ 인 원이 되고, 파면 2는 중심이  $S_2$ 이고 반지름이  $v(t_1 - T)$ 인 원이 된다.  $S_1$ 과  $S_2$  사이의 거리가  $v_s T$ 이므로 A, B가 측정하는 소리의 파장  $\lambda_A, \lambda_B$ 는 각각 파면 1과 파면 2 사이의 거리와 같다.

$$\lambda_A = vt_1 - \{v(t_1 - T) + v_s T\} = (v - v_s)T = \frac{v - v_s}{f}$$

$$\lambda_B = vt_1 - \{v(t_1 - T) - v_s T\} = (v + v_s)T = \frac{v + v_s}{f}$$

또  $v = f\lambda$ 이므로 관찰자 A, B가 측정하는 소리의 진동수  $f_A, f_B$ 는 다음과 같다.

파원이 관찰자에게 가까워질 때  $f_A = \frac{v}{\lambda_A} = \frac{v}{v - v_s} f$

파원이 관찰자로부터 멀어질 때  $f_B = \frac{v}{\lambda_B} = \frac{v}{v + v_s} f$

따라서 파원이 다가올 때 정지한 관찰자는 파원이 내는 소리보다 높은 소리를 듣고, 파원이 멀어질 때 정지한 관찰자는 파원이 내는 소리보다 낮은 소리를 듣는다.

### 관찰자의 운동과 도플러 효과

관찰자가 파원에 가까워지거나 파원에서 멀어질 때는 같은 시간 동안 관찰자를 지나가는 파면의 개수가 변해 관찰자가 측정하는 소리의 진동수가 변한다.

그림 III-17에서 시간  $t$  동안 정지해 있는 관찰자 A를 지나가는 음파의 길이는  $vt$ 이고, A를 통과하는 파면의 개수는  $\frac{vt}{\lambda}$ 이다. A가 측정하는 소리의 진동수는

$$f = \frac{\text{파면의 개수}}{t} = \frac{v}{\lambda}$$

이며, A가 측정하는 소리의 파장  $\lambda$ 는 변하지 않는다.

관찰자 B처럼 속도  $v_0$ 로 파원을 향해 운동하는 경우 시간  $t$  동안 B를 지나가는 음파(소리)의 길이는  $vt + v_0t$ 이므로 B를 통과하는 파면의 개수는  $\frac{vt + v_0t}{\lambda}$ 이다. 관찰자 B가 파원에 가까워질 때 측정하는 소리의 진동수는  $f' = \frac{v + v_0}{\lambda} = \frac{v + v_0}{v} f$ 이다.

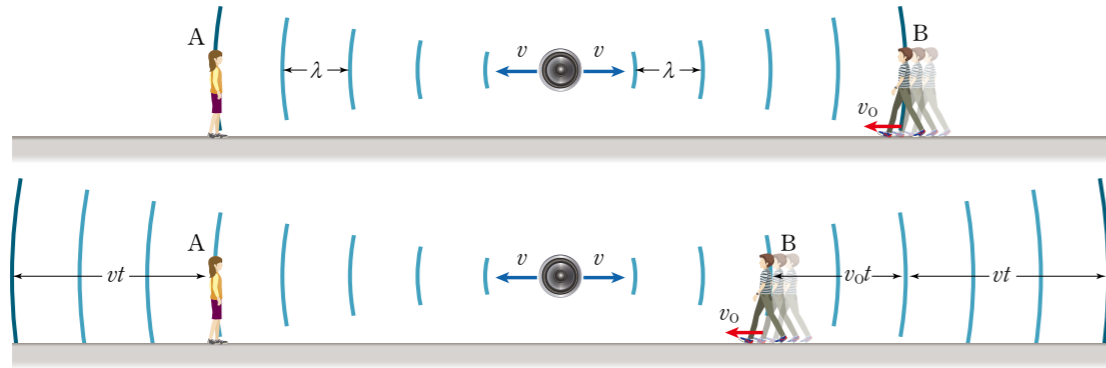


그림 III-17 관찰자가 운동할 때 도플러 효과

따라서 파원과 관찰자가 모두 움직일 때 도플러 효과의 관계식은 다음과 같다.

$$f' = \frac{v \pm v_0}{v \mp v_s} f$$

서로 가까워질 때:  $+v_0, -v_s$   
서로 멀어질 때:  $-v_0, +v_s$

이 식은 진동수  $f$ , 속도  $v$ 인 파동을 발생시키는 파원이 매질에 대해 속도  $v_s$ 로 운동하고, 관찰자가 매질에 대해 속도  $v_0$ 로 운동할 때 관찰자가 측정하는 소리의 진동수  $f'$ 을 나타낸다.

#### 스스로 확인

- 1 파원과 관찰자가 서로 가까워지는 동안 관찰자가 측정하는 소리의 진동수는 파원의 진동수보다 (커진다, 작아진다).
- 2 기차역에서 일정한 속도로 멀어지는 기차 소리를 들을 때 소리의 높낮이 변화를 설명해 보자.

#### 관찰자가 파원으로부터 멀어지는 경우

관찰자가 파원으로부터 멀어지는 방향으로 운동할 때는 관찰자가 파원에 대해  $-v_0$ 의 속력으로 운동하는 것으로 볼 수 있다.

### 도플러 효과의 활용

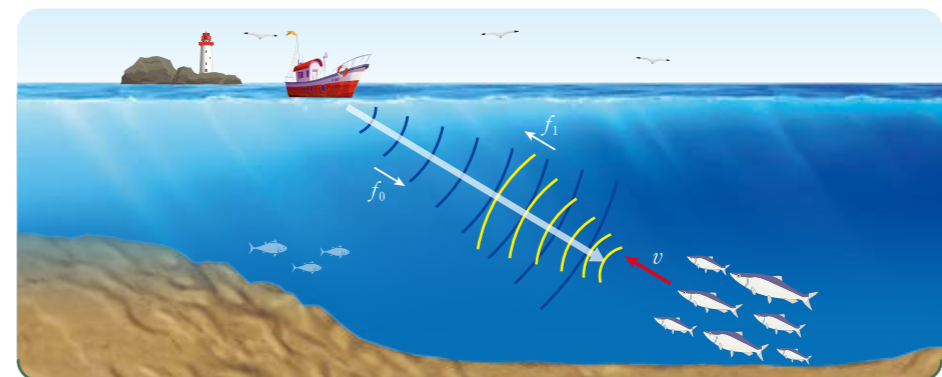
도플러 효과를 활용하면 파원이나 관찰자의 속력을 측정할 수 있다. 초음파 기기로 그림 III-18과 같이 심장 내부를 흐르는 혈액의 적혈구에서 반사한 초음파의 도플러 효과를 분석해 영상으로 나타낼 수 있다. 이를 이용해 혈액이 흐르는 속력을 계산하고 심장 판막이 제대로 작동하고 있는지를 확인할 수 있다.



그림 III-18 도플러 초음파 영상

#### 자료 분석 도플러 효과를 이용해 물고기 떼의 속력 구하기

도플러 효과는 물고기 떼를 추적하는 데에도 이용된다. 초음파의 속력을  $V$ , 물고기 떼의 속력을  $v$ , 배에 장치한 어군 탐지기에서 내보내는 초음파의 진동수를  $f_0$ 이라고 하자. 어군 탐지기를 향해 운동하는 물고기의 입장에서 관찰자가 운동하는 셈이므로 물고기가 관측하는 초음파의 진동수  $f_1 = \frac{V+v}{V} f_0$ 이다. 물고기 떼에서 반사한 초음파의 진동수도  $f_1$ 이므로 반사한 초음파를 배에서 관측할 때는 파원이 운동하는 것과 같아서 탐지기에서 관측하는 초음파의 진동수  $f_2 = \frac{V}{V-v} f_1 = \frac{V+v}{V-v} f_0$ 이다. 따라서 물고기 떼의 속력  $v = \frac{f_2 - f_0}{f_2 + f_0} V$ 이다.



## 전자기파를 이용한 도플러 효과

음파나 초음파뿐만 아니라 전자기파에서도 도플러 효과를 관찰할 수 있다.

기상 레이더는 대기 중으로 마이크로파를 보내고 물방울이나 눈송이 등에서 반사해 돌아올 때의 진동수 변화를 측정해 대기의 운동 상태를 관측한다. 이것으로 강수량, 구름의 진로 등을 예상할 수 있다.

비행기는 도플러 레이더에서 지상으로 보낸 전파의 도플러 효과를 분석해 비행 속력을 측정하고, 좌우로 보낸 전파의 도플러 효과를 이용해 실제 운동 방향과 비행기 정면이 향하는 방향 사이의 차이를 파악한다.

이 밖에도 야구공이나 자동차의 속력을 측정하는 스피드 건, 실내에서 사람의 움직임을 감지하고 필요할 때만 전기 기구를 가동시키는 전기 절약 시스템, 드론 충돌 회피 시스템 등에 도플러 효과를 이용한다. 또 천체 물리학 분야에서는 천체에서 오는 전자기파의 도플러 효과를 관측해 천체의 운동을 파악하기도 한다. 이처럼 다양한 분야에서 도플러 효과를 유용하게 활용하고 있다.



### 글쓰기

도플러 효과를 이용할 때 대기 중에서는 빛이나 적외선 같은 전자기파를, 수중에서는 초음파를 이용하는 까닭을 조사해 글로 써 보자.

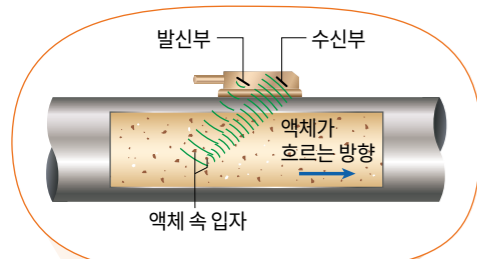


그림 III-19의 도플러 유속계는 액체 속의 부유 입자에서 반사하는 초음파의 진동수 변화를 측정해 관 속에 흐르는 액체의 속력을 구한다. 또 그림 III-20과 같은 어선의 어군 탐지기도 도플러 효과를 이용해 물고기의 움직임을 탐지한다. 탐지기에서 특정 진동수의 초음파를 보내고 물체에서 반사해 돌아오는 초음파의 진동수 변화를 측정하면 물체의 속력을 구할 수 있다.

이 밖에도 도플러 효과는 그림 III-21과 같이 영화나 게임에서 현실감 있는 음향 효과를 위해 이용하기도 한다. 도플러 효과가 일어나는 것처럼 움직이는 물체에서 나는 소리의 진동수가 커지다가 작아지도록 하면 비행기나 자동차가 빠르게 지나가는 장면을 더욱 생생하게 구현할 수 있다.



그림 III-19 도플러 유속계



그림 III-20 어군 탐지

그림 III-21 도플러 효과를 적용한 음향 효과



### 스스로 확인

- 1 몸속을 흐르는 혈액의 속력을 측정하는 장치는 초음파의 ( ) 효과를 이용한다.
- 2 물고기 떼가 다가올 때는 어군 탐지기에서 보낸 초음파의 진동수보다 물고기 떼에서 반사해 돌아오는 초음파의 진동수가 작다. (○, ×)

### 스스로 정리

**공유** 도플러 효과를 시각적으로 표현하는 예술 작품을 만들어 보고, 이를 공유 플랫폼에 공유해 보자.