

# 03

## 빛과 물질의 이중성

**학습 목표** 빛과 물질의 이중성이 영상 정보 저장과 전자 현미경 등 다양한 분야에서 활용됨을 설명할 수 있다.

태양 전지에 빛을 비추면 전기를 만들 수 있다. 이러한 원리는 빛이 가지는 파동의 성질과 입자의 성질 중 무엇과 더 관련이 있을까?



### 광전 효과

1887년 헤르츠(Hertz, H. R., 1857~1894)는 (-)전하로 대전된 아연판 표면에 자외선을 비추었더니 전자가 방출되는 현상을 발견했다. 다음 활동을 하면서 자외선에 의해 전자가 방출되는 현상을 관찰해 보자.

#### 실험 영상



#### 준비물

- 알루미늄 캔
- 알루미늄 포일
- 에보나이트 막대
- 털가죽  사포
- 자외선등  비커
- 접착테이프
- 가위  클립
- 장갑
- 레이저 보안경

#### 안전

자외선등을 사용할 때에는 레이저 보안경을 쓴다.

### 해보기

#### 자외선에 의해 전자가 방출되는 현상 관찰하기

1. 알루미늄 캔의 표면을 사포로 문질러 코팅을 벗겨 낸다.
2. 알루미늄 포일을 잘게 자르고 클립을 이용해 1의 알루미늄 캔에 붙인 뒤 비커 위에 올려놓는다.
3. 에보나이트 막대를 털가죽으로 마찰하여 알루미늄 캔에 접촉한 뒤 알루미늄 포일의 변화를 관찰한다.
4. 3의 알루미늄 캔 표면에 자외선등을 비춰 알루미늄 포일에 나타나는 변화를 관찰한다.



● 3에서와 같은 결과가 나타나는 까닭은 무엇인지 설명해 보자.



● 4에서와 같은 결과가 나타나는 까닭은 무엇인지 토의해 보자.



(-)전하로 대전된 에보나이트 막대를 알루미늄 캔에 접촉하면 에보나이트 막대의 전자는 잘게 자른 알루미늄 포일에 고르게 퍼져 알루미늄 포일끼리 서로 밀어낸다. 여기에 자외선을 비추면 알루미늄 캔의 전자가 자외선으로부터 에너지를 얻어 알루미늄 캔 밖으로 튀어나와 캔에 연결된 알루미늄 포일이 오므라든다.

그림 III-17과 같이 금속에 비추는 빛에 의해 금속 내부의 전자가 밖으로 튀어나오는 현상을 **광전 효과**라고 하며, 이때 튀어나오는 전자를 **광전자**라고 한다.

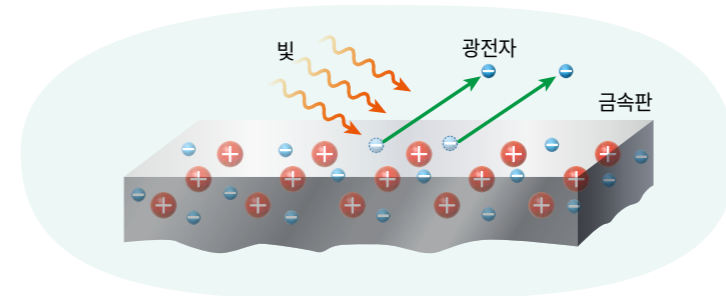


그림 III-17 광전 효과와 광전자

그림 III-18과 같이 실험 장치를 구성한 뒤 금속판에 비추는 빛의 진동수와 세기 및 금속 막대와 금속판에 걸어 주는 전압을 조절하면서 회로에 흐르는 전류를 측정해, 다음과 같은 실험 결과를 얻었다.

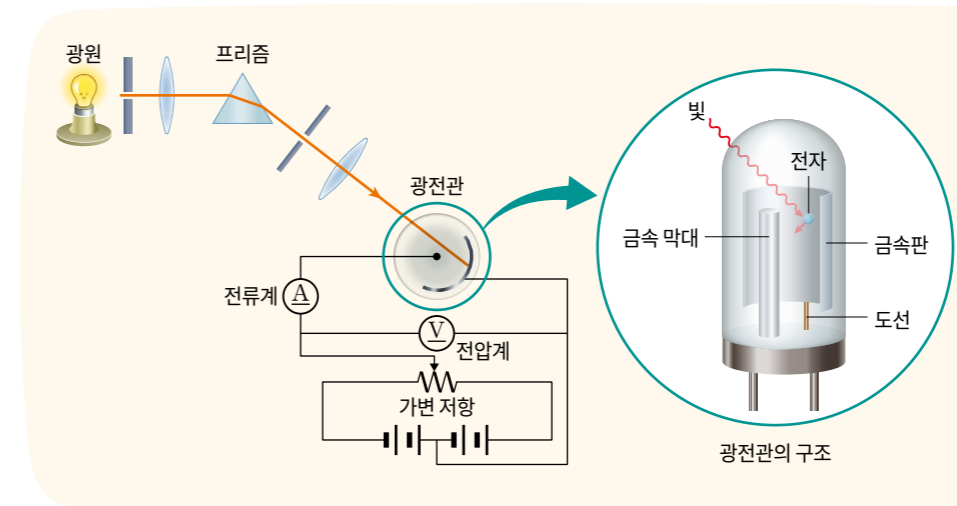


그림 III-18 광전 효과 실험 장치와 결과

빛의 파동설에 따르면 빛에너지는 진동수와 빛의 세기에 따라 달라진다. 따라서 진동수가 작더라도 세기가 충분히 강한 빛을 비추면 광전자가 튀어나와야 한다. 하지만 빛의 세기가 아무리 강해도 진동수가 작으면 광전자가 튀어나오지 않았다. 이러한 실험 결과를 설명하기 위해서는 빛에 대한 새로운 이론이 필요했다.

#### 연계 중학교 과학

마찰 전기와 대전 및 전자의 이동에 대해 배웠다.

#### 연계 전자기와 양자

광전 효과에서 빛과 물질이 상호작용 하는 방식을 '빛과 정보 통신' 단원에서 배운다.

#### 광전 효과 실험 결과

1. 일정한 진동수 미만의 빛을 비추면 빛의 세기에 관계없이 광전자가 튀어나오지 않으며, 일정한 진동수 이상의 빛은 빛의 세기가 아무리 약해도 광전자가 즉시 튀어나온다.
2. 같은 진동수의 빛을 비추는 경우 단위 시간당 방출하는 광전자의 수는 빛의 세기에 비례하며, 빛의 진동수가 클수록 방출하는 광전자의 운동 에너지가 크다.

## 광양자설

**아인슈타인**  
(Einstein, A., 1879~1955)  
독일의 물리학자. 상대성 원리와 중력에 관한 이론을 발표했으며, 광전 효과에 대한 연구로 1921년 노벨 물리학상을 수상했다.

**플랑크**  
(Planck, M. K. E. L., 1858~1947)  
독일의 물리학자. 원자의 에너지는 연속적인 값을 갖지 못하며, 진동수에 비례하는 불연속적인 값만 가질 수 있다는 양자설을 주장했다.

1905년 아인슈타인은 빛을 연속적인 파동의 흐름이 아니라 진동수에 비례하는 에너지를 갖는 불연속적인 에너지 입자의 흐름으로 가정함으로써 광전 효과 실험 결과를 설명할 수 있었다. 이 불연속적인 에너지 입자를 **광자(광양자)**라고 하며, 진동수가  $f$ 인 빛을 구성하는 광자 한 개가 갖는 에너지  $E$ 는 다음과 같다.

$$E = hf$$

이를 **광양자설**이라고 한다. 여기서  $h$ 는 플랑크 상수로  $6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ 이다. 광양자설에 따르면 광전 효과는 광자와 전자의 충돌로 볼 수 있다. 전자는 금속 원자핵으로부터 전기적 인력을 받고 있어서 이 인력을 벗어나기 위해서는 광자로부터 특정한 값보다 큰 에너지를 받아야 한다. 이 특정한 값의 에너지를 갖는 광자의 진동수를 그 금속의 **한계 진동수**라고 한다.

그림 III-19의 (가)와 같이 빛의 진동수가 금속의 한계 진동수보다 작으면, 빛의 세기가 아무리 강해도 전자가 방출되지 않는다. 그러나 그림 (나)와 같이 빛의 진동수가 금속의 한계 진동수보다 크면 빛의 세기가 약해도 전자 하나가 얻는 에너지가 커서 광전자가 방출된다. 방출된 광전자의 운동 에너지는 광자의 에너지가 클수록 크고, 방출되는 광전자의 수는 비취 주는 광자의 수가 많을수록 많아진다.

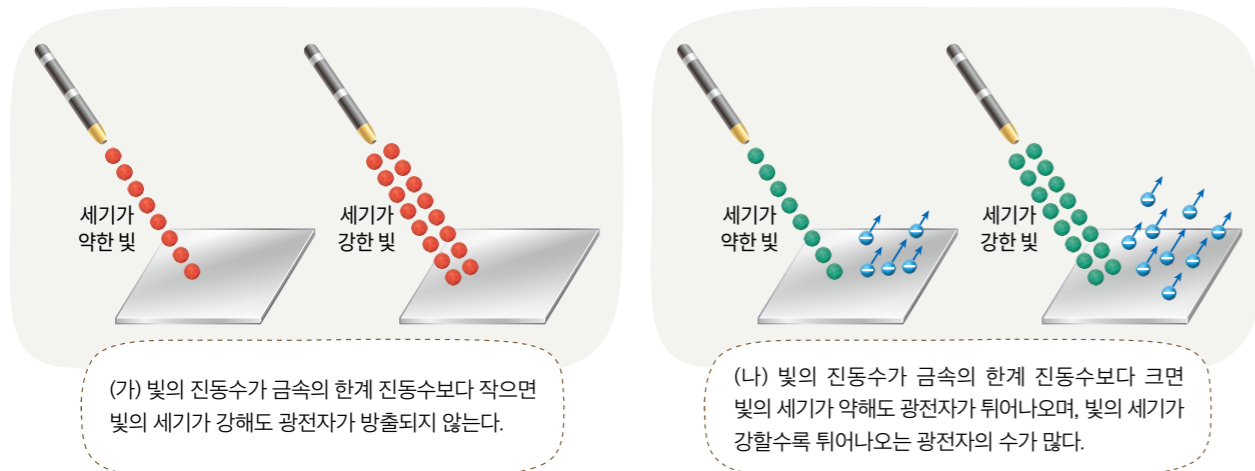


그림 III-19 광자의 에너지와 한계 진동수

### 스스로 확인

- 1 금속에 비춘 빛에 의해 금속 내부 전자가 튀어나오는 현상을 ( )이라고 한다.
- 2 광양자설에 따르면 빛은 연속적인 ( 파동, 입자 )의 흐름이 아니라 불연속적인 에너지를 갖는 ( 파동, 입자 )의 흐름으로 볼 수 있다.

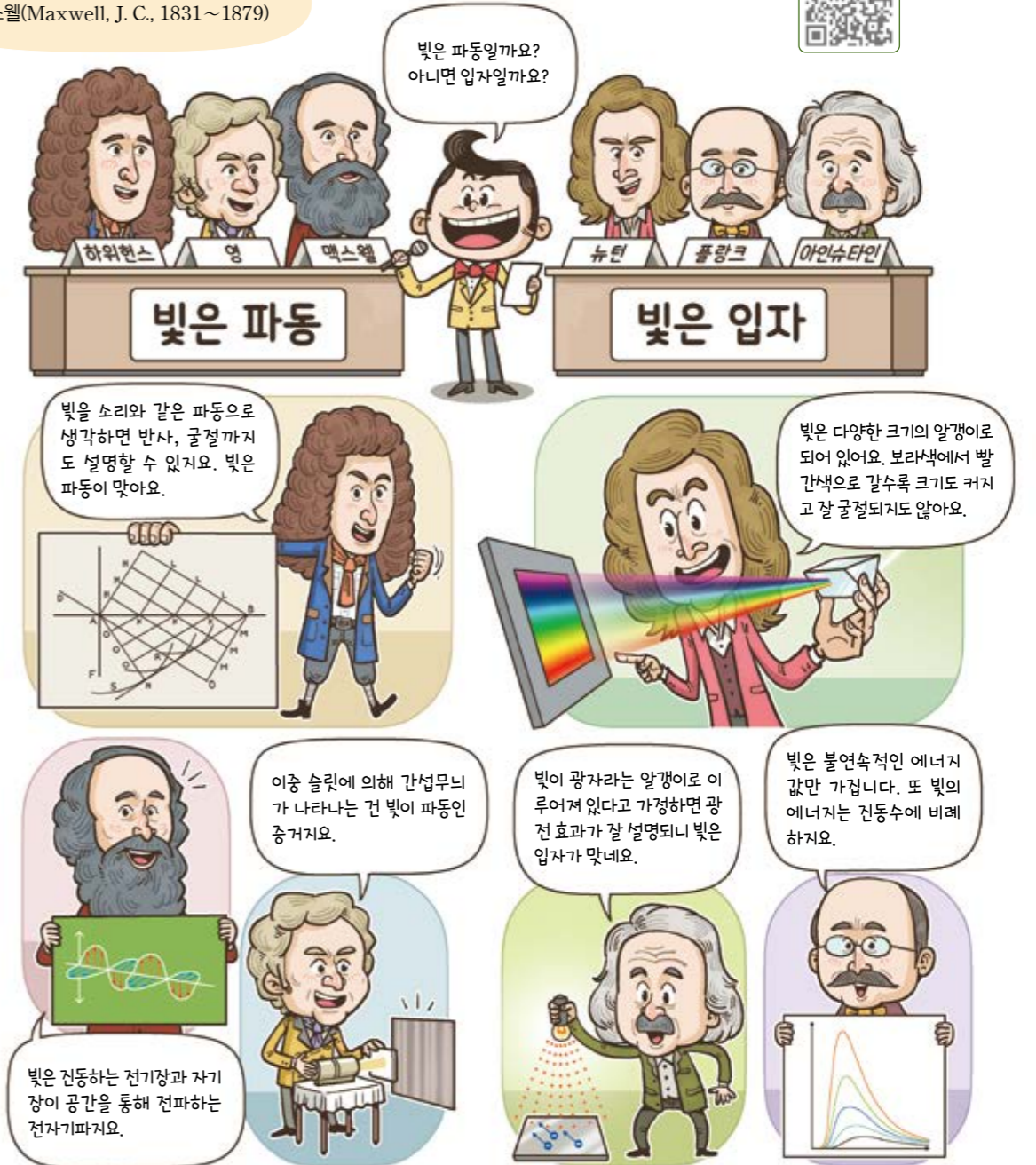
## 빛의 이중성

아인슈타인이 광전 효과 실험 결과를 바탕으로 한 광양자설을 발표한 뒤로 빛의 본성이 입자인지 파동인지에 대한 논란이 다시 일어났다.

애니메이션



- 하위헌스(Huygens, C., 1629~1695)
- 맥스웰(Maxwell, J. C., 1831~1879)



그렇다면 빛은 입자일까, 파동일까? 지금까지의 연구 결과에 따르면 빛은 입자의 성질과 파동의 성질을 모두 가지는 것으로 볼 수 있다. 이것을 **빛의 이중성**이라고 한다.



**드브로이**  
(de Broglie, L. V., 1892~1987)  
프랑스의 물리학자. 1920년 '드브로이 물질파'의 개념을 주장했다.

**잠깐 활동**  
드브로이의 물질파 이론에 따르면 우리 주변의 물체는 모두 파동성을 지닌다. 하지만 물체들이 파동성을 드러내지 않는 까닭은 무엇인지 설명해 보자.

**물질파**

1920년대 물리학자들은 광전 효과를 통해 파동의 성질을 가지는 빛이 입자의 성질도 가진다는 사실을 알게 되었으며, 이러한 빛의 이중성으로부터 물질의 이중성에 대한 의문을 가지게 되었다. 1924년 드브로이는 전자와 같은 입자도 파동의 성질을 가질 것이라고 주장했다. 드브로이에 따르면 질량이  $m$ 인 입자가 속력  $v$ 로 운동할 때 입자의 운동과 관련된 파동의 파장  $\lambda$ 는 다음과 같다.

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

이와 같이 운동하는 입자가 나타내는 파동을 **물질파** 또는 **드브로이파**라고 하며,  $\lambda$ 를 **물질파 파장** 또는 **드브로이 파장**이라고 한다.

**물질의 이중성**

1927년 데이비슨(Davisson, C. J., 1881~1958)과 거머(Germer, L. H., 1896~1971)는 그림 III-24와 같은 실험 장치를 이용해 니켈 시료의 결정면과 수직을 이루도록 전자선을 입사해 간섭 현상이 나타나는 것을 확인했다. 특정 산란각에서 보강 간섭을 할 조건으로부터 구한 전자선의 파장은 16.5 nm로 드브로이가 제안한 물질파 파장 16.7 nm와 거의 같았기 때문에, 이 실험은 드브로이의 이론을 실험적으로 증명한 첫 사례가 되었다.

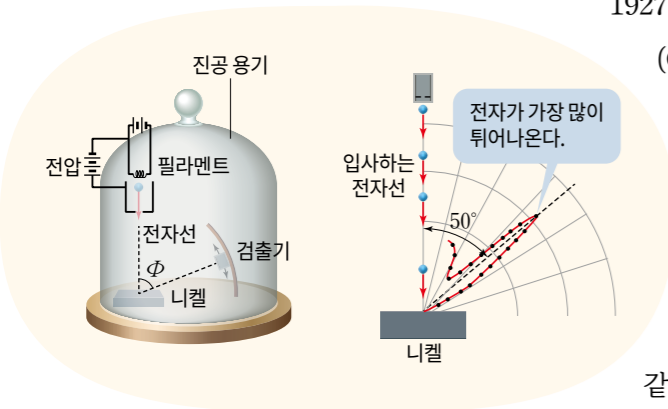


그림 III-24 데이비슨·거머의 실험

또 1927년 톰슨(Thomson, G. P., 1892~1975)은 금속박 뒤에 형광판을 두고 전자선을 입사해 그림 III-25와 같은 무늬를 얻었다. 이 무늬는 금속박에 X선을 입사해 얻은 무늬와 유사했다. 이로써 전자도 파동의 성질을 가지고 있음을 알게 되었다.

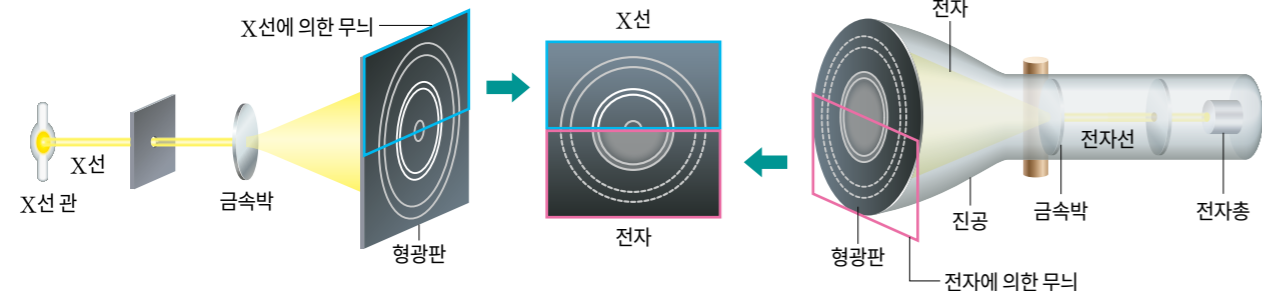


그림 III-25 금속박에 의한 X선과 전자의 무늬 비교

다음 활동을 하면서 전자가 어떤 특성을 가지고 있는지 알아보자.

**해보기** 문제 해결 능력 | 의사 결정 능력

**전자의 입자성과 파동성 설명하기**

다음은 전자가 입자인지 파동인지 확인하기 위한 실험 과정과 결과를 나타낸 것이다.

**전자가 만드는 간섭무늬 관찰 실험**

**[과정]** 이중 슬릿과 스크린을 설치하고, 전자총으로 전자들을 쏘아 이중 슬릿을 지나게 한 뒤 스크린에 도착한 전자를 관찰한다.

**[결과]** 이중 슬릿을 통과해 스크린에 도달하는 전자의 개수가 많아질수록 스크린에는 전자의 양이 많은 지점과 적은 지점이 뚜렷해진다.

- 실험 결과에 따르면 전자가 파동성과 입자성 중 어떤 특성을 가지고 있다고 주장할 수 있는지 설명해 보자.

이중 슬릿을 통과해 스크린에 도달하는 전자는 스크린에 점으로 나타난다. 이를 통해 전자의 입자성을 확인할 수 있다. 또 스크린에 도달하는 전자의 개수가 많아질수록 위치에 따라 전자가 많이 도달하는 부분과 적게 도달하는 부분이 반복적으로 나타난다. 이것은 빛의 간섭 실험에서와 같이 전자도 보강 간섭 또는 상쇄 간섭을 한 것으로 설명할 수 있으며, 이를 통해 전자의 파동성을 확인할 수 있다.

여러 실험 결과로부터 물질도 빛과 같이 입자성과 파동성을 모두 가진다는 것을 알 수 있으며, 이것을 **물질의 이중성**이라고 한다.

**스스로 확인**

- 1 운동하는 입자가 나타내는 파동을 물질파라고 한다. (○, ×)
- 2 물질의 ( )은/는 물질이 입자성과 파동성을 모두 가지고 있다는 것이다.

**\*분해능**  
서로 떨어져 있는 두 점을 식별할 수 있는 렌즈의 능력으로 분해능이 높을수록 선명한 상을 볼 수 있다.

### 전자의 파동성 이용

일반적으로 현미경의 분해능은 파장이 짧을수록 높는데, 전자의 파동성을 이용하면 광학 현미경보다 분해능이 높은 현미경을 만들 수 있다. 광학 현미경은 아무리 배율을 높여도 가시광선 파장보다 짧은 간격은 구별할 수 없다. 그러나 전자 현미경에서 사용하는 전자의 물질파 파장은 전자의 속력을 조절해 가시광선의 파장보다 훨씬 짧게 만들 수 있으므로 그만큼 짧은 간격도 자세히 관찰할 수 있다. 전자 현미경은 실물 크기의 약 10만 배 이상으로 물체를 확대해 볼 수 있어서 세포의 구조나 바이러스성 병원체를 자세히 관찰할 수 있다. 전자 현미경은 전자를 사용하기 때문에 광학 현미경과 달리 자기렌즈로 전자선을 초점에 모은다.

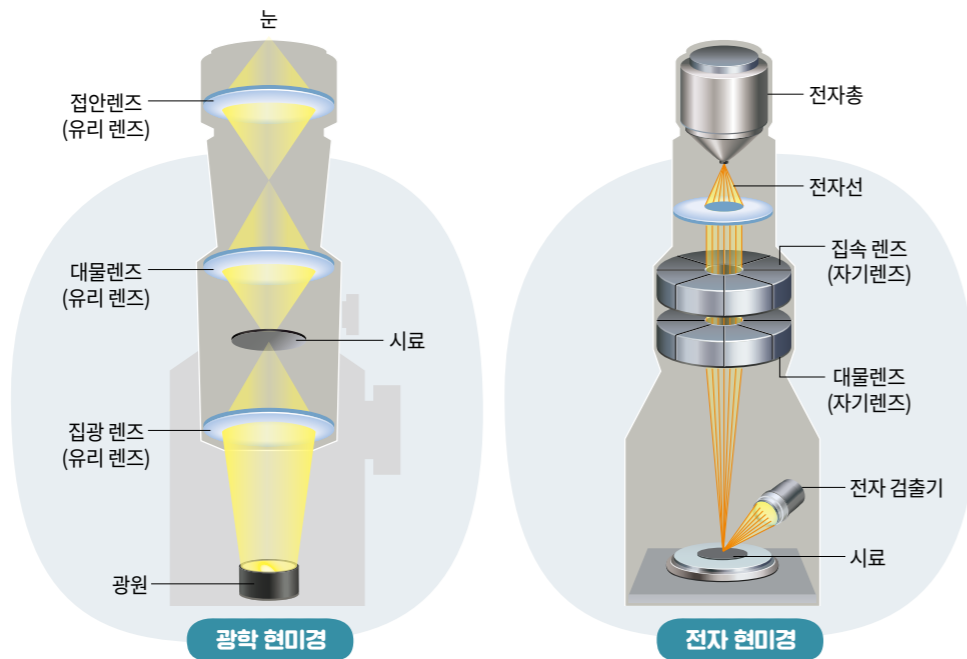
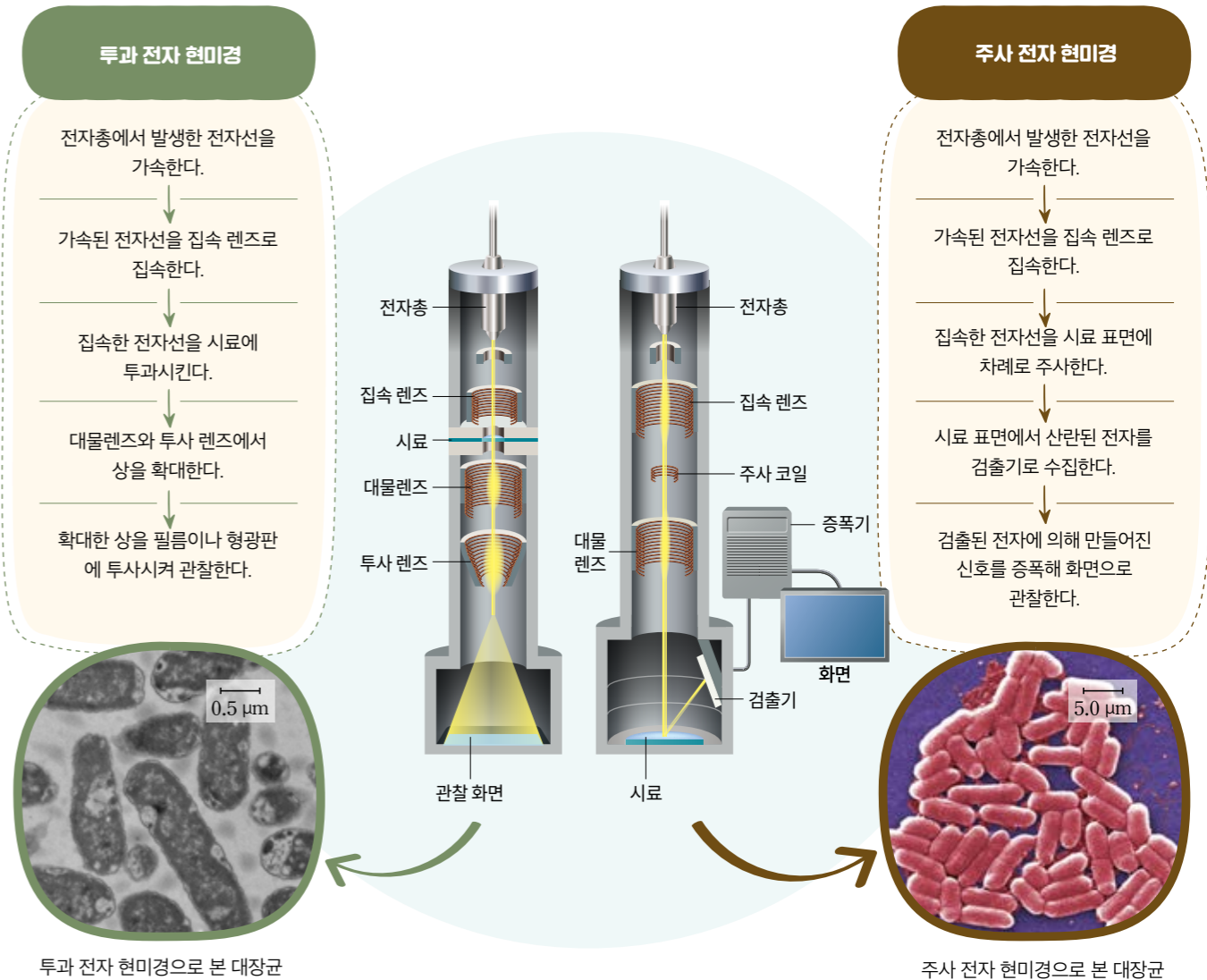


그림 III-26 광학 현미경과 전자 현미경의 구조

전자 현미경에는 투과 전자 현미경(TEM, transmission electron microscope)과 주사 전자 현미경(SEM, scanning electron microscope)이 있다. 투과 전자 현미경에서는 전자가 시료를 투과하는 동안 속력이 느려지므로 전자의 물질파 파장이 커져서 분해능이 낮아지기 때문에 시료를 얇게 만들어야 한다. 주사 전자 현미경은 관찰하려는 시료의 표면에 계속해서 전자를 쏘이므로 시료의 전기 전도도가 좋아야 한다. 전기 전도도가 나쁘면 시료에 전하가 모여 관찰을 계속하기 어렵다. 따라서 생물 시료는 전기 전도도가 좋은 물질로 표면을 얇게 코팅해 관찰한다. 일반적으로 주사 전자 현미경의 배율은 투과 전자 현미경의  $\frac{1}{10}$  정도로 낮지만 표면을 삼차원 구조로 볼 수 있는 장점이 있다.



투과 전자 현미경으로 본 대장균

주사 전자 현미경으로 본 대장균

그림 III-27 투과 전자 현미경과 주사 전자 현미경

전자 현미경은 물질 속의 원자 배치 상태 등을 알아내는 데 매우 유용하므로 오늘날 물리학, 생명과학, 화학, 재료 공학 등 과학기술 분야에서 광범위하게 활용하고 있다.

#### 스스로 확인

- 1 일반적으로 현미경의 분해능은 파장이 짧을수록 높다. (○, ×)
- 2 광학 현미경은 유리 렌즈로 ( )을/를 초점에 모으고, 전자 현미경은 자기렌즈로 ( )을/를 초점에 모은다.

#### 스스로 정리

**공유** 빛과 물질의 이중성을 재미있게 표현하는 네 칸 만화를 만들어 공유 플랫폼에 공유해 보자.

## 굴절률이 음수인 메타물질



▲ 메타 물질을 통해 손으로 가려진 뒤쪽이 보이는 모습



▲ 일반 물질(왼쪽)과 메타 물질(오른쪽)에서의 굴절 모습

일반적인 물질은 굴절률이 양수이지만 메타 물질은 굴절률이 음수인 특별한 성질을 갖는 물질이다. 메타 물질은 대부분 빛과 상호작용 할 수 있는 미세 구조로 되어 있는데, 아직 자연에서 발견된 적이 없고 인공적으로 설계된다. 메타 물질은 굴절률이 음수이기 때문에 일반적인 물질과 달리 빛이 경계면을 지나갈 때 진행 방향이 반대로 꺾이는 것처럼 작용한다. 따라서 메타 물질을 이용하면 평평한 표면으로도 렌즈와 비슷하게 빛을 한 점에 모을 수 있어 렌즈나 광학 장치를 개선하는 데 활용할 수 있다. 또 레이더나 통신 시스템의 성능을 향상할 수 있고 눈에 보이지 않는 투명 방어 차량이나 장벽과 같은 장치를 개발할 수도 있다.

메타 물질은 아직까지는 연구 단계에 있지만 광학, 전자기학, 통신, 에너지 저장, 센서 기술, 의학 등 다양한 분야에서 과학기술의 혁신을 이끌 것으로 기대를 모으고 있다.

### 글쓰기

메타 물질을 만든다면 어떤 곳에 사용하고 싶은지 써 보자.



## 사람 몸의 일부를 암호로 활용하는 생체 인식 전문가

커리어넷  
누리집



생체 인식은 실물인 신분증이나 문자와 숫자 등으로 이루어진 비밀번호와 달리 사람마다 다른 고유한 특징을 신호로 만들어 암호로 이용하는 기술이다. 따라서 생체 인식은 도난을 당하거나 분실할 염려가 없고 위조하기도 어려워 보안이 우수하다. 우리가 사용하는 스마트폰의 지문 인식, 얼굴 인식 등을 통한 본인 인증 시스템도 생체 인식 기술을 활용한 것이다.

생체 인식 전문가는 디지털카메라, 스캐너 등의 센서로 지문, 얼굴, 눈동자의 홍채와 같은 생체 정보를 파악해 본인을 확인하는 장치를 개발한다.

### 어떤 역량을 가지면 좋을까?

- 복잡한 계산 규칙을 이해하고, 논리적으로 생각하는 수리·논리력
- 생체 구조에 대한 이해와 기술적으로 구현하기 위한 공간 지각력
- 컴퓨터 언어와 프로그래밍에 관한 흥미
- 기계나 장비를 다루며, 실험을 통해 문제를 해결하는 능력

### 어떻게 준비할까?

- 수학, 과학, 컴퓨터 프로그래밍에 대한 기본 지식을 쌓고 광학 기술을 배워야 한다.
- 실험 기구 및 탐구 설계에 관한 다양한 경험을 한다.
- 생체 구조에 대한 다양한 책을 읽고 배경지식을 넓힌다.

### 체험 학습

생체 인식 개발과 관련한 연구소의 견학 계획을 세워 보자.