

04

광전 효과

학습 목표 광전 효과에서 빛과 물질이 상호작용 하는 방식을 알고, 디지털 영상 정보, 광센서, 태양 전지 등 광전 효과와 관련된 다양한 기술을 조사할 수 있다.

적외선을 감지하는 광센서가 탑재된 카메라를 이용하면 집에 혼자 있는 반려동물의 모습을 영상에 담을 수 있다. 광센서는 어떻게 동물의 움직임을 감지할까?



헤르츠
(Hertz, H. R., 1857~1894)
독일의 물리학자. 전자기파의 존재를 최초로 확인했다. 헤르츠는 1887년 자외선을 쬐인 금속판에서 전자가 방출되는 것을 발견했는데 이것이 최초로 관찰된 광전 효과이다.

금속 표면에 빛을 쬐일 때 전자가 금속으로부터 튀어나오는 현상을 **광전 효과**라고 하며, 이때 방출되는 전자를 광전자라고 한다. 광전 효과는 1887년 헤르츠가 처음 발견하였고, 이후 실험을 통해 정확하게 관측되었다. 그림 II-33은 광전 효과 실험 장치와 전원 장치의 전압에 따른 광전류의 세기를 나타낸 것이다.

진공관을 통해 금속판에 빛을 비추면 광전자가 방출되어 (+)전하로 대전된 금속판으로 끌려가고, 금속판에 도달한 광전자에 의한 광전류를 전류계에서 측정한다.

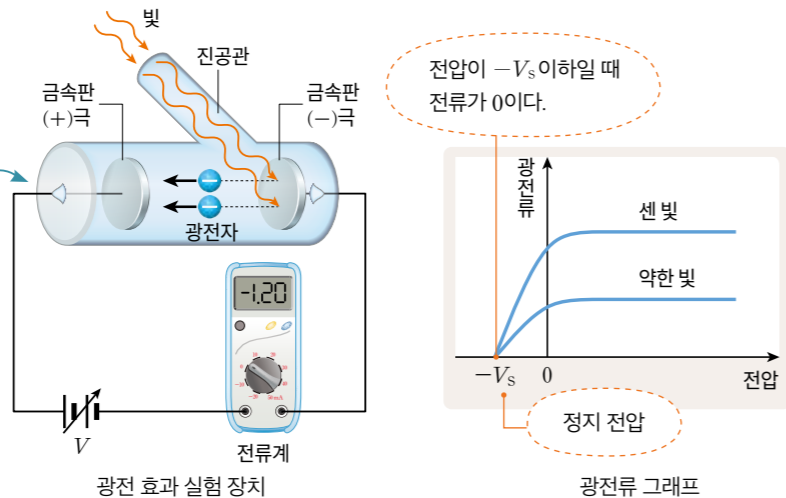


그림 II-33 광전 효과 실험

연계 물리학
광전 효과와 광양자설을 '빛과 물질' 단원에서 배웠다.

실험 결과 전류가 0인 순간 두 금속판 사이의 전압은 광전자의 단위 전하당 최대 운동 에너지와 같다. 이는 가장 큰 운동 에너지를 갖는 광전자를 막을 수 있을 만큼의 에너지라는 것을 의미하며, 이 전압을 **정지 전압**이라고 한다. 정지 전압 V_s 에서 전자의 전하량 e 가 한 일은 광전자의 최대 운동 에너지 K_{max} 와 같다.

$$K_{max} = \frac{1}{2}mv^2 = eV_s$$

광전 효과 실험 결과 광전자의 최대 운동 에너지는 빛의 세기와 무관하게 나타났다. 이는 빛의 세기가 클수록 에너지가 크다는 파동의 특성에 맞지 않는다. 즉, 빛을 전자기파로 인식하는 고전 물리학 이론으로는 광전 효과를 설명할 수 없었다. 광전 효과를 설명하기 위해서는 빛에 대한 새로운 이론이 필요했다.

아인슈타인은 플랑크 양자설을 바탕으로 하여 광전 효과를 설명했다.

플랑크 양자설

1900년 플랑크는 원자는 에너지를 연속으로 방출할 수 없다는 양자설을 발표했다. 플랑크는 고체 내 원자의 진동 에너지가 다음과 같이 불연속적인 값만 가질 수 있다고 가정했다.

$$E = nhf$$

이 방정식에서 f 는 원자의 진동수이고, h 는 플랑크 상수로 $6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ 의 값을 가진다. n 은 0, 1, 2, ... 등과 같은 정수이다.

$$n=0 \text{ 일 때: } E=(0)hf=0$$

$$n=1 \text{ 일 때: } E=(1)hf=hf$$

$$n=2 \text{ 일 때: } E=(2)hf=2hf$$

⋮

따라서 원자는 $hf, 2hf, 3hf, \dots$ 등의 에너지를 가질 수 있지만 $\frac{2}{3}hf, \frac{3}{4}hf$ 와 같은 값은 가질 수 없다. 즉, 에너지는 양자화되어 있다. 또 플랑크는 고전 물리학 이론에서처럼 원자가 진동할 때 항상 전자기파를 방출하는 것은 아니고 원자의 진동 에너지가 변할 때에만 복사선을 방출하며, 방출되는 에너지는 원자의 에너지 변화량과 같다고 제안했다. 플랑크의 제안에 따르면, 원자의 에너지가 $3hf$ 에서 $2hf$ 로 변하면 원자는 에너지가 hf 인 복사선을 방출한다.

플랑크 양자설을 빛에 확장하여 적용한 것이 아인슈타인의 **광양자설**이다. 1905년 아인슈타인은 광전 효과 실험 결과를 설명하기 위해서 에너지 보존과 플랑크 양자설을 결합한 빛의 입자 이론인 광양자설을 제안했다. 광양자설에 따르면 빛은 광자라고 하는 띄엄띄엄하고 양자화된 에너지 묶음으로 구성되며, 광자의 에너지는 빛의 진동수에 따라 달라진다. 진공에서 빛의 속력을 c , 빛의 진동수와 파장을 각각 f, λ 라고 하면 광자 1 개의 에너지 E 는 다음과 같다.

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

플랑크
(Planck, M. K. E. L., 1858~1947)
독일의 물리학자. '양자'라는 용어를 처음 사용했다고 알려졌다. 플랑크는 양자 가설 이론으로 1918년 노벨 물리학상을 받았다.

양자
에너지와 물질의 불연속적인 단위나 양을 나타내는 물리학 개념이다. 1900년 플랑크는 흑체 복사에 대한 연구 논문에서 에너지가 이러한 양자로 교환된다는 것을 처음으로 제안했다.

아인슈타인
(Einstein, A., 1879~1955)
독일의 물리학자. 광전 효과 실험 결과를 설명하기 위해 1905년 광양자설을 발표했다. 아인슈타인은 빛이 입자라는 것을 밝혀낸 업적을 인정받아 1921년 노벨 물리학상을 수상했다.

광양자설에 따르면 금속 내 전자와 충돌한 광자는 소멸할 수 있으며, 광자가 갖고 있던 에너지는 모두 전자에 전달된다.

금속 내부의 전자는 전기력에 의해 원자에 속박되어 있다. 금속판에 빛을 쬐었을 때 금속 표면의 전자가 금속판을 벗어나기 위해서는 필요한 에너지를 광자로부터 흡수해야 한다. 이때 전자가 흡수한 광자의 에너지가 너무 낮으면 전자는 금속을 벗어날 수 없다. 전자를 금속에서 벗어나게 하는 데 필요한 최소한의 에너지를 금속의 **일함수**라고 하며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W = hf_0$$

여기서 W 는 일함수, f_0 은 문턱 진동수이다. 문턱 진동수는 금속에 따라 다르며, 금속에 비추는 빛의 진동수가 문턱 진동수보다 작으면 광전 효과가 일어나지 않는다.

그림 II-34는 금속의 일함수를 표현한 것이다. 문턱 진동수보다 높은 진동수의 광자와 충돌한 전자는 금속 표면을 벗어나 방출될 수 있다. 아인슈타인은 이를 에너지 보존과 결합하여 다음과 같이 표현했다.

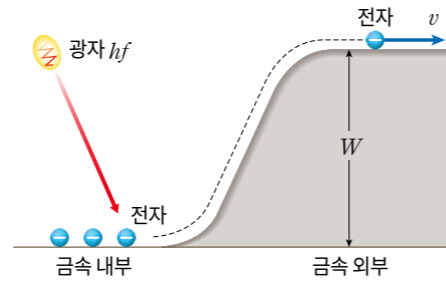


그림 II-34 금속의 일함수

$$\frac{1}{2}mv^2 = hf - W = hf - hf_0$$

여기서 $\frac{1}{2}mv^2$ 은 금속에서 방출된 전자가 가질 수 있는 최대 운동 에너지로, 쬐인 빛의 진동수와 금속의 일함수에 따라 결정된다.

아인슈타인이 광양자설에서 내세운 가설은 1916년 밀리컨의 실험으로 확인되었고, 빛은 입자들의 집합이라는 것이 증명되었다. 과학자들은 빛이 파동인가 입자인가에 대한 오랜 논쟁을 끝내고 빛의 이중성을 받아들였다.

스스로 확인

- 1 금속 표면에 빛을 비출 때 표면에서 전자가 방출되는 현상을 ()이라고 한다.
- 2 금속의 ()은/는 전자를 금속에서 벗어나게 하는 데 필요한 최소 에너지이며, 플랑크 상수와 ()의 곱과 같다.

밀리컨
(Millikan, R. A., 1868~1953)
미국의 물리학자. 1916년 아인슈타인의 광양자설을 실험으로 증명했고, 플랑크 상수의 값을 정밀하게 측정했다.

광전 효과의 이용

광전 효과는 광센서, 태양 전지 등 다양한 기술의 기초가 되며, 디지털 영상 정보를 저장하는 데에도 이용된다. 광센서는 광 다이오드라는 반도체 소자로 구성된다. 광 다이오드는 p-n 접합을 가진 반도체 소자로, 빛에너지를 흡수할 때 광전 효과에 의해 광전류를 발생시킨다. 이와 같이 광 다이오드는 빛 신호를 전기 신호로 변환하므로, 빛을 감지하는 센서에 사용된다. 다음 활동을 하면서 광전 효과를 활용하는 다양한 기술에 대해 알아보자.

연계 물리학

p-n 접합과 다이오드에 대해 '빛과 물질' 단원에서 배웠다.

광 다이오드



디지털 해보기

탐구 능력 | 의사 결정 능력

광전 효과를 이용하는 다양한 기술 사례 조사하기

- 1 우리 주변에서 볼 수 있는 여러 가지 기기와 산업 기술에서 광전 효과 원리를 이용하는 사례를 찾아 어떻게 이용하는지 조사한다.
- 2 **공유** 모둠원들과 토의하여 조사한 사례 중 하나를 선택하고, 발표 자료를 만들어 발표한 뒤, 공유 플랫폼에 공유한다.

- 준비물
- 스마트 기기

광전 효과를 이용한 전하 결합 소자(CCD)

CCD란	디지털 이미지 센서를 이루는 소자이다.
기능	빛을 전기 신호로 변환하여 디지털 이미지를 얻는다.
이용 분야	디지털카메라, 스캐너, 캠코더와 같은 영상 장치의 센서에 많이 쓰인다.
원리	디지털카메라 렌즈를 통해 들어온 빛은 광다이오드에 의해 전기 신호로 변환된다.

입사하는 빛

- 빨간색 빛만 통과시킨다.
- 초록색 빛만 통과시킨다.
- 파란색 빛만 통과시킨다.



로봇 팔의 눈 광다이오드

전문 요리사처럼 능숙하게 음식을 조리하는 로봇 팔은 인간형 로봇과 달리 눈이 없는데 어떻게 정확하게 움직일 수 있을까?

로봇 팔을 이루는 여러 개의 관절은 움직임을 제어하기 위해 서보모터와 함께 작동하는데, 이때 광 다이오드를 사용해 각 관절의 위치를 알아낸다. 로봇 팔에는 관절마다 광 다이오드가 부착되어 있어, 빛이 광 다이오드에 닿으면 광 다이오드는 그 빛을 감지하고 전기 신호로 변환한다. 로봇 팔은 이 신호를 활용해 미리 설정된 목표 위치에 도달한다.

로봇 팔의 움직임은 광 다이오드로부터 전달된 전기 신호의 세기에 따라 결정된다. 예를 들어 로봇 팔을 앞으로 움직이기 위해서는 해당 관절의 전기 신호가 강해져야 하고, 뒤로 당기려면 신호가 약해져야 한다.

이렇게 로봇 팔은 광 다이오드를 사용하여 위치를 감지해 정밀한 동작을 할 수 있다. 이러한 센서와 제어 시스템의 조합은 로봇 기술을 발전시켜 로봇 팔이 인간과 협력해 다양한 작업을 수행하는 미래의 세상으로 우리를 이끌 것이다.



글쓰기

관절이 두 개인 로봇 팔을 일상생활에 활용할 수 있는 방안을 고안해 글로 써 보자.



태양 전지는 광전 효과를 이용한 기술 사례 중 하나로, p 형 반도체와 n 형 반도체를 사용해 태양의 빛에너지를 전기 에너지로 바꾸는 장치이다. 그림 II-35는 태양 전지의 구조와 작동 원리를 나타낸 것이다. 태양광이 태양 전지에 닿으면 광자가 반도체 내부로 흡수되면서 전자와 양공 쌍이 생성된다. 이렇게 생성된 전자는 n 형 반도체 쪽으로 이동하여 쌓이고, 양공은 p 형 반도체 쪽에 쌓이면서 기전력이 발생한다. 여기에 전구나 모터와 같은 장치를 연결하면, n 형 반도체에 있던 전자들이 회로를 따라 p 형 반도체 쪽으로 이동하면서 전류가 흘러 장치가 작동한다. 태양 전지는 태양광 발전 시스템이나 휴대용 전자 기기 등 다양한 분야에서 사용되고 있다.

태양 전지는 사실상 거대한 광 다이오드라고 할 수 있다. 광 다이오드가 작은 전류와 전압을 생성한다면 태양 전지는 큰 전류와 전압을 생성한다. 조도계, 화재 감지기, 컴퓨터 단층 촬영(CT) 장비와 같은 의료 기기, 자율 주행차에도 광 다이오드가 사용된다. 이와 같이 광전 효과의 원리는 다양한 현대 기술에 활용되고 있다.

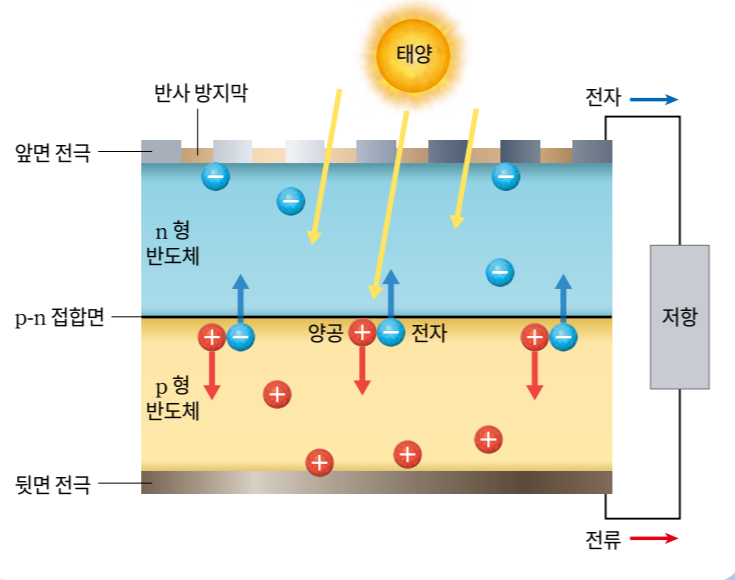


그림 II-35 태양 전지의 구조와 작동 원리

스스로 확인

- 태양 전지의 n 형 반도체에서는 전자가, p 형 반도체에서는 양공이 각각 발생하여 p-n 접합면으로 이동한다. (O, X)
- 조도계, 화재 감지기 등은 ()에 도달하는 빛의 세기 변화를 이용해 작동한다.

스스로 정리

공유 우리 학교 시설물 중 광전 효과 원리를 이용한 것을 찾아보고, 공유 플랫폼에 공유해 보자.