

④ 광전효과의 해석

반도체 등 현대 IT 문명의 길 터

글_ 정현식 서강대 물리학과 교수 hcheong@sogang.ac.kr



태양전지를 사용하는 건물

아인슈타인의 가장 잘 알려진 업적은 특수 상대성 이론과 일반 상대성 이론이지만, 정작 그에게 노벨상을 안겨준 업적은 광전효과의 이론적 해석이었다는 것을 알고 있는 사람은 많지 않다. 1905년의 위대한 논문 중에서 가장 먼저 3월 18일에 저널 Annalen der Physik에 발표된 <Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt-빛의 방출과 변환에 관련된 예시적 관점에 대하여>라는 제목의 논문에서 아인슈타인은 통계 역학적인 방법론을 통해 빛이 연속적인 에너지를 갖는 파동이 아니라 일정한 단위의 에너지를 갖는 양자(量子; quantum)로 기술될 수 있음을 유도하고, 이러한 관점에서 그 이전에 실험적으로 알려진 광전효과의 여러 가지 특성을 잘 설명할 수 있음을 제시하였다.

1887년 헤르츠가 '광전효과' 처음 발표

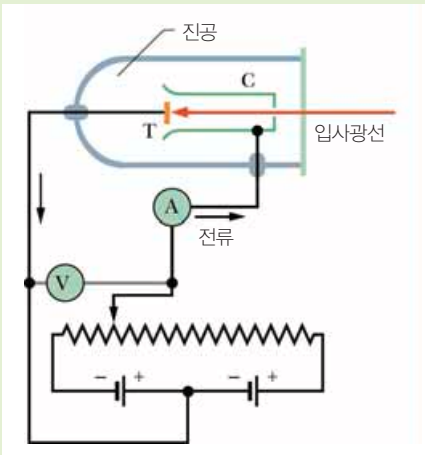
광전효과는 헤르츠에 의해 1887년에 처음으로 보고되었다.

그는 잘 알려진 대로 전자기파를 발생시키고 이를 다시 검지하는 실험을 하고 있었는데, 그 실험 과정에서 전자기파의 수신 안테나로 사용하던 방전 전극 사이의 전류가 외부에서 쏘여준 빛에 따라 달라지고, 특히 자외선을 쏘여주었을 때 전류가 많아진다는 사실을 발견했다. 그러나 그는 이를 설명할 적절한 이론을 찾지 못하고 단지 실험적 관찰로서만 보고하였다. 1897년에 음극선관을 이용하여 전자를 발견한 J. J. 톰슨(1906년 노벨상 수상)은 이러한 광전효과가 금속표면에 자외선을 쏘여주면 전자가 튀어나오기 때문이라는 것을 1899년에 밝혀냈다. 음극선에 대한 연구로 1905년에 노벨상을 수상한 독일의 필립 에두아르트 안톤 레나르트는 탄소 방전 등을 사용한 일련의 정밀한 실험을 통하여 다음과 같은 사실을 밝혀냈다.

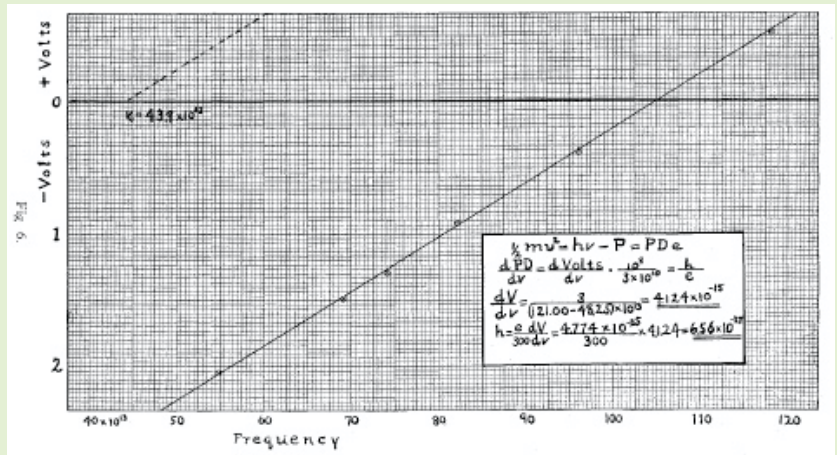
첫째, 금속 표면에서 방출되는 전자의 최대 운동에너지는 쏘여주는 빛의 세기에는 상관없이 빛의 파장에 따라 달라진다. 파장이 짧을수록 전자의 최대 운동에너지가 커진다. 또한 일정한 파장보다 긴 파장의 빛을 쏘여주면 전자가 방출되지 않는다.

둘째, 방출되는 전자의 수, 즉 전류의 크기는 쏘여주는 빛의 세기에 비례한다는 것이었다.

이러한 관찰 결과는 그때까지 알려진 영국의 제임스 클라크 맥스웰의 고전 전자기학으로는 이해될 수 없었다. 고전 전자기학으로도 금속에 빛을 쏘여주었을 때 전자가 방출된다는 것은 설명할 수 있다. 즉 빛(전자기파)의 전기장의 진동에 의해 금속 내의 전자가 강제진동을 하게 되고 이를 통해 빛에서 전자로 에너지가 전달된다. 충분한 양의 에너지가 전자에 전달되면 전자의 운동에너지가 금속 안의 원자 또는 이온이 전자를 잡아두고 있는 에너지보다 커져서 전자가 금속을 이탈하여 방출된다고 해석할 수 있다. 그런데, 전기장의 크기는 빛의 세기가 커질수록 커지기 때문에 빛의 세기에 따라 방출되는 전자의 운동에너지가 커질 것으로 예측할 수 있으며, 파장이 긴(에너지가 작은) 빛이



광전효과 실험 장치의 개요도



밀리칸이 광전효과 논문에 발표한 실험 데이터

라도 세기를 크게 하거나 오랫동안 쬐어주면 전자에 전달되는 에너지가 누적되어 전자가 방출될 수 있을 것이다. 이러한 고전적인 모델의 예측은 레나르트가 관찰한 결과를 전혀 설명할 수 없었다.

아인슈타인, 고전 전자기학 문제점 해결

아인슈타인은 그의 광전효과 논문에서 이러한 기존 이론의 문제점을 명쾌하게 해결하는 아주 간단한 모델을 제시하였다. 즉, 빛이 연속적인 에너지를 갖는 것이 아니라 $h\nu$ 의 에너지를 갖는 양자로 기술될 수 있음을 보였는데, 여기서 ν 는 빛의 진동수로서 빛의 속도를 빛의 파장으로 나눈 값이고, h 는 플랑크의 흑체복사 이론에서 나오는 플랑크 상수다. 이렇게 빛을 양자로 해석하면 레나르트가 관찰한 모든 현상을 잘 설명할 수 있었다.

빛의 양자가 전자에 의해 흡수되면 $h\nu$ 만큼의 에너지를 얻게 되는데, 그 중 일정한 양의 에너지는 전자가 정전기적으로 금속에 속박되어 있는 퍼텐셜 에너지를 극복하고 금속으로부터 떨어지는데 소요된다. 이렇게 금속 표면으로부터 전자를 떼어내기 위한 최소한의 에너지를 '일함수' 라고 부른다.

전자가 빛의 양자를 흡수하는 순간에 금속의 표면에 있지 않고 표면 안쪽에 있었다면, 금속 표면까지 이동하는 데 소요되는 에너지도 있을 것이므로, 금속 표면에서 떨어져 나온 다음에 전자가 가질 수 있는 에너지는 원래 빛의 양자의 에너지에서 일함수를 뺀 것보다 작게 된다. 그러므로 방출되는 전자가 가질 수 있는 운동에너지의 최대값은 $h\nu - W$ 가 된다. 또한 입사하는 빛

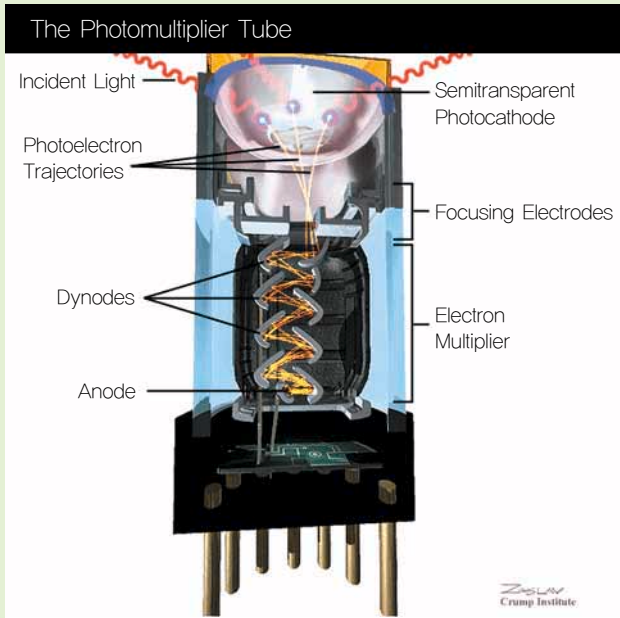
의 진동수가 W/h 보다 작으면 전자에 전달되는 에너지가 일함수보다 작으므로 전자가 방출될 수 없게 된다.

빛의 세기를 크게 하면 빛의 양자의 수가 증가하지만 개개의 양자가 갖고 있는 에너지는 변하지 않으므로 방출되는 전자의 수는 증가하나 전자가 갖는 운동에너지의 최대값은 변하지 않는다.

이러한 아인슈타인의 이론은 그때까지 완벽하다고 믿어지던 빛의 파동이론과 전면적으로 대립되는 것으로서 많은 물리학자들의 반발을 불렀다. 그 중 미국의 물리학자 R. 밀리칸은 이러한 아인슈타인의 이론이 틀렸다는 것을 증명하기 위해 10여 년 간에 걸쳐 매우 정밀한 실험을 반복하였다. 그러나 그 결과는 그의 원래 의도와는 달리 아인슈타인의 이론이 옳다는 것을 증명하였으며, 방출되는 전자의 운동에너지의 최대값을 빛의 진동수의 함수로 측정함으로써 플랑크의 상수 h 를 정밀하게 결정할 수 있었다.

밀리칸은 아인슈타인보다 2년 뒤인 1923년에 노벨물리학상을 수상하였다. 일반적으로 그는 기름방울 실험을 통해 기본 전하량이 양자화되어 있다는 것을 밝힌 공로로 노벨상을 수상한 것으로 알려져 있으나, 사실은 그 업적과 더불어 광전효과의 정밀한 실험을 통해 아인슈타인의 이론을 증명한 공로를 함께 인정받아 노벨상을 수상하였다.

광전효과의 관찰과 아인슈타인의 이론으로 빛이 가지고 있는 에너지가 연속적이지 않고 양자화되어 있다는 것은 밝혀져 있으나 빛이 '빛알'이라고 불리는 입자들로 이루어졌다는 것을 완전히 입증한 것은 미국의 물리학자 아서 H. 콤프턴(1927년 노벨상



광증배관의 개요도



아인슈타인의 오리지널 광전효과 논문

수상)이 빛과 전자의 충돌을 입자들 사이의 충돌로 완벽하게 기술할 수 있음을 실험적으로 보임으로써 이루어졌다.

이러한 일련의 과정을 통해 빛이 입자의 성질을 갖고 있다는 것이 밝혀졌지만, 일상에서 관찰되는 간섭이나 에돌이와 같은 빛의 파동 성질을 동시에 설명하기 위해서는 E. 슈뢰딩거(1933년 노벨상 수상)와 W. 하이젠베르크(1932년 노벨상 수상)에 의한 양자역학의 정립이 필요하였다.

광전효과 이론에서 광다이오드 탄생

좁은 의미에서 광전효과라고 하면 레나르트의 실험에서와 같이 금속 표면에 자외선 또는 X-선 빛을 비추었을 때 전자가 방출되는 현상을 일컫는다. 그러나 넓은 의미에서는 빛에 의해 전도전자가 발생하는 일련의 현상을 모두 통틀어서 광전효과라고 부른다.

먼저 좁은 의미의 광전효과를 이용하는 장치 중 가장 대표적인 것은 광증배관이다. 광증배관의 음극에 빛이 비추어지면 광전자가 방출되는데, 이 광전자들은 음극에 대해 높은 전압이 걸려 있는 양극을 향해 가속된다. 이렇게 가속된 광전자들이 다이노드라고 불리는 중간 전극을 때리게 되면 여기에서 원래의 전자 수보다 훨씬 많은 전자들이 방출되게 된다. 이렇게 수가 증가된 전자들이 다시 양극을 향해 가속되다가 다음 다이노드를 때리면 다시 그 수가 증폭되게 된다.

이러한 과정을 반복하면 처음 음극에서 방출된 전자에 의해 발생된 전자들이 양극에 도달할 즈음에는 그 수가 많게는 거의 100만 배로 증폭되어 측정할 수 있을 정도의 전류신호를 주게 된다. 이러한 광증배관은 그 감도가 매우 높아서 한 번에 빛알 한 개를 감지할 수 있을 정도다. 광증배관은 매우 약한 빛을 감지해야 하는 분광 실험이나 고에너지 입자실험 등에서 사용된다.

넓은 의미의 광전효과를 응용하는 장치들은 우리 주위에서 많이 찾아볼 수 있다. 이런 장치들은 대부분 반도체 물질을 사용하는데, 반도체 물질이 빛을 흡수하면 가전자대에 있는 전자가 빛의 에너지를 받아서 전도전자대로 들뜨고 전자가 떠난 가전자대에는 양공이 생기게 된다.

가전자대에 있는 전자는 전류를 흐르게 하는데 기여하지 않으나 전도전자대에 있는 전자는 전류에 기여한다. 양공 또한 양전하로서 전류에 기여한다. 따라서 빛을 흡수한 반도체 물질은 전



CCD 칩과 CCD 칩을 사용하는 디지털 카메라

자와 양공 때문에 전류를 더 잘 흘리므로 저항이 낮아진다. 예를 들어, 복사기나 레이저 프린터의 감광드럼이 이러한 현상을 이용한다. 감광드럼은 먼저 정전기를 띠도록 준비된다. 여기에 빛을 비추면 빛이 닿은 부분의 저항이 낮아져서 그 부분의 정전기가 방전된다. 그 다음에 토너의 잉크를 이 드럼에 뿌리면 정전기를 띤 부분에만 토너의 가루가 달라붙게 되고 이를 다시 정전기를 이용해서 종이 위에 옮긴 다음 열을 가해서 인쇄하게 된다. 따라서 빛이 닿지 않은 부분에만 잉크가 묻어서 원하는 이미지가 인쇄된다.

광통신이나 리모컨의 수신부, 광센서 등에 사용되는 광다이오드도 광전효과를 응용한 장치이다. 양전하를 가진 p형의 반도체와 음전하를 가진 n형의 반도체를 접합한 pn 접합 다이오드의 접합부에 빛을 비추어주면 전자가 전도전자대로 들뜨고 가전자대에는 양공이 생기는데, pn 접합의 전위차 때문에 전자는 n형 쪽으로 움직이고 양공은 p형 쪽으로 움직여서 전류가 발생하게 된다. 이러한 전류를 측정하면 빛의 유무나 세기를 알 수 있다.

디지털 카메라나 캠코더에 사용되는 CCD 칩도 이러한 광다이오드와 유사한데, 주로 실리콘 반도체를 작은 면적의 픽셀로 나누어 각 픽셀에 닿는 빛의 양에 따라 발생하는 전도전자의 양을 세어서 각 픽셀에 닿는 빛의 세기를 기록하고, 이로부터 2차원 이미지를 얻게 된다.

태양광전지도 광전효과원리 응용

태양광전지도 광다이오드와 유사한 원리를 사용한다. 태양광전지는 태양으로부터 오는 빛의 에너지를 바로 전기에너지로 변

환하는 장치이다. 광다이오드와 마찬가지로 pn 접합으로 이루어지는데, 빛을 흡수함으로써 전자와 양공이 생기고, 이들이 각각 n형과 p형 쪽으로 이동하여 전류를 발생시키는 것은 광다이오드와 동일하다. 그러나 광전지에서는 전력을 얻는 것이 주목적이므로 빛을 쬐었을 때 발생하는 전류와 두 전극 사이의 전위차(전압)의 곱이 최대가 되는 조건으로 최적화해야 한다.

태양광전지의 설계에서 중요한 요소는 사용하는 반도체의 밴드갭 에너지이다. 밴드갭 에너지는 가전자대와 전도전자대 사이의 에너지를 의미하는데, 이 에너지보다 낮은 에너지를 갖는 빛은 흡수되지 않는다. 이는 마치 금속에서의 일함수와 유사하다. 밴드갭 에너지보다 큰 에너지를 갖는 빛이 흡수되면, 밴드갭 에너지만큼의 에너지 이외에는 전력으로 변환되지 않으므로 에너지 낭비로 효율이 떨어지게 된다. 따라서 태양에서 오는 빛의 에너지에 따른 세기 분포를 고려하여 가장 적절한 밴드갭 에너지를 갖는 반도체를 선택하여야 한다.

그러나 한 종류의 반도체만으로는 최적화에 한계가 있으므로, 높은 에너지 변환 효율을 얻기 위해서는 서로 다른 반도체를 적층하여 작은 밴드갭 에너지를 갖는 반도체층에서는 에너지가 작은 빛을 흡수하고 큰 밴드갭 에너지를 갖는 반도체층에서는 에너지가 큰 빛을 흡수하도록하여 효율을 높이는 적층형 태양전지를 사용하기도 한다.

아인슈타인의 광전효과 이론은 상대성 이론만큼 일반에게 널리 알려지지 않았지만, 이렇듯이 많은 응용을 통해 우리의 생활과 더 밀접하게 연관되어 있다. 사실 초고속 정보통신 기술의 핵심요소인 광전자 소자 중의 많은 종류가 광전효과를 이용하는 소자라는 점을 보면, 광전효과와 이해와 응용이 현대 IT 문명의 직접적인 필요조건이었다고 말할 수 있을 것이다.

아인슈타인은 위대한 이론 물리학자였지만 그의 연구 결과가 바로 이러한 유용한 응용으로 연결되었다는 사실은, 외견상 응용과 직접 관련이 없을 것 같은 기초과학의 연구가 응용 기술의 개발에 있어서 얼마나 중요한가를 여실히 보여주는 좋은 예라고 하겠다. ㉓



글쓴이는 서울대 물리학과를 졸업 후, 미국 하버드 대학교에서 물리학 석사와 박사학위를 받았다. 미국 국립 재생에너지 연구소 책임연구원을 역임했으며, 현재 한국 물리학회 학술 실무이사, 2005 세계 물리의 해 한국 행사 조직위원회 사무국의 학술 담당을 겸임하고 있다.