

# 03

## 시간과 공간의 상대성

**학습 목표** 상대성 이론의 원리를 이해하고 사회에 미친 영향을 조 사할 수 있다.

우주로부터 날아오는 입자 중 한 가지인 뮤온은 수명이 수백만분의 1 초 정도로 매우 짧아서 지표면에 도달하기도 전에 소멸해야 한다. 하지만 실제로는 지표면에서 뮤온을 관찰할 수 있다. 그 까닭은 무엇일까?



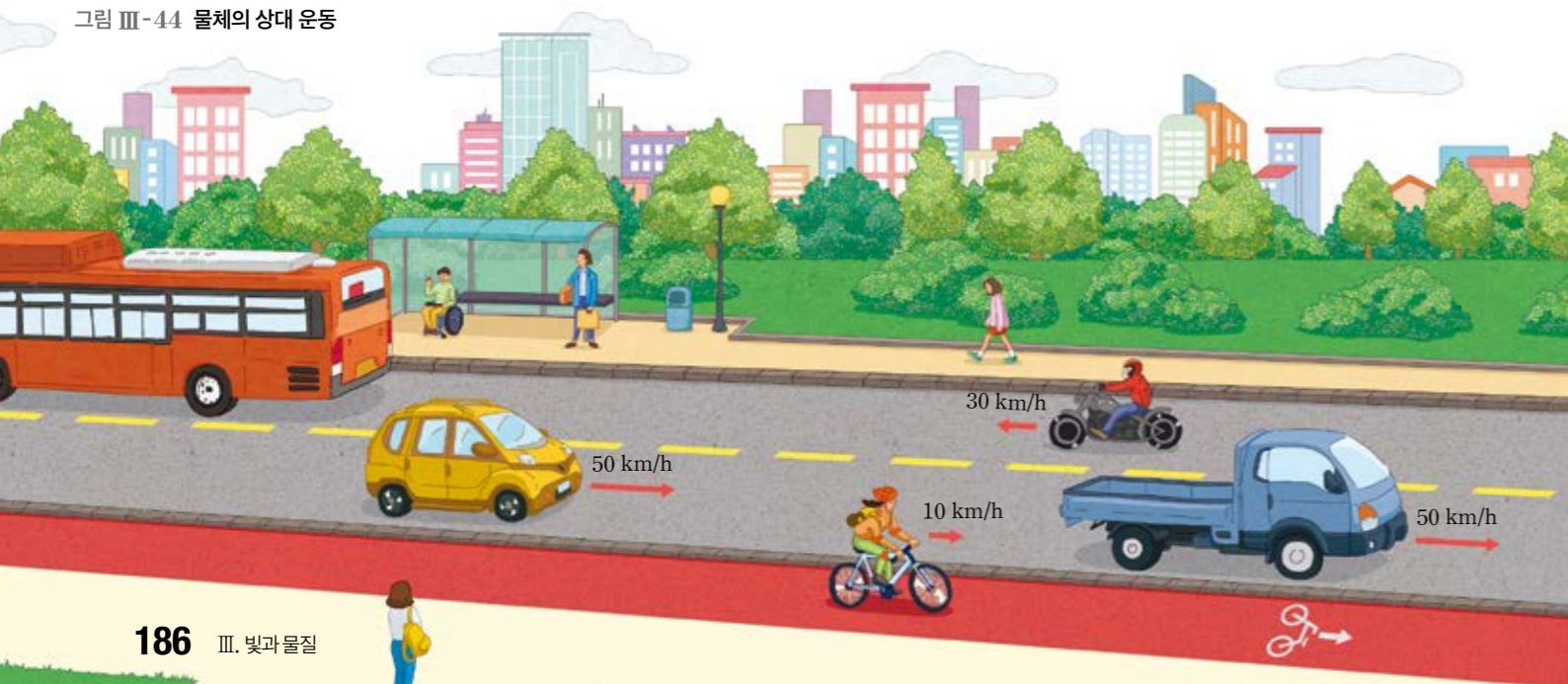
### 상대 속도

물체의 운동은 보는 사람에 따라 달라지기 때문에 기준을 어떻게 정하는지가 매우 중요하다. 그림 III-44에서와 같이 50 km/h의 속력으로 달리는 트럭을 인도에 정지한 사람이 보면 트럭의 속력이 50 km/h로 보이지만 트럭과 같은 방향과 속력으로 달리는 승용차에 있는 사람이 보면 정지해 있는 것처럼 보인다. 이와 같이 물체의 운동을 관찰자에 대한 상대적인 움직임으로 설명할 수 있으며, 이때 관측 되는 물체의 속도를 **상대 속도**라고 한다.

#### 집단 활동

그림 III-44에서 자전거에서 본 트럭의 속력과 오토바이에서 본 승용차의 속력을 각각 이야기 해 보자.

그림 III-44 물체의 상대 운동



### 갈릴레이의 상대성 원리

물체의 운동을 관찰하기 위해서는 기준 좌표계가 필요하다. 특히 정지해 있거나 등속 직선 운동을 하는 기준 좌표계를 **관성 좌표계**라고 한다. 그림 III-45와 같이 오른쪽으로 등속도로 움직이는 버스에서 관찰자 A가 손잡이 a를 보고 있고, 정지한 버스에서 관찰자 B가 손잡이 b를 보고 있다고 하자. 서로 다른 두 관성 좌표계의 관찰자 A, B는 물체의 운동을 어떻게 관찰할까?

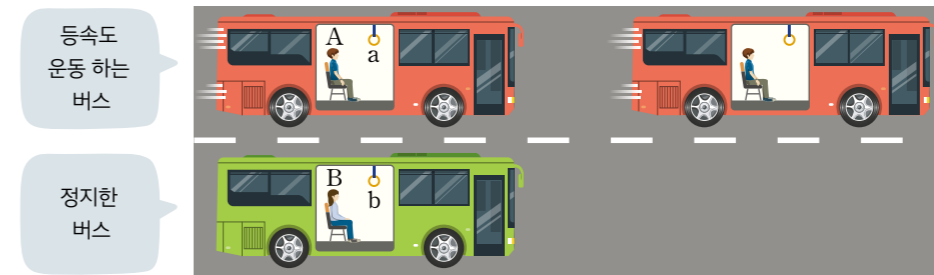


그림 III-45 두 버스의 상대 운동

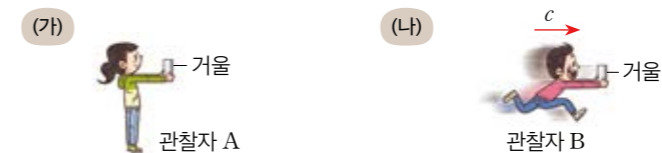
관찰자 B는 손잡이 b가 정지해 있고, 손잡이 a가 오른쪽으로 등속 운동을 하는 것으로 본다. 한편 관찰자 A는 손잡이 a가 정지해 있고, 손잡이 b가 왼쪽으로 등속 운동을 하는 것으로 본다. 이때 서로 다른 관성 좌표계에서 물체의 운동은 상대 속도 차이만 있을 뿐 운동 법칙은 동일하게 적용된다. 따라서 버스 안에서는 버스가 운동하는지 정지해 있는지 알 수 없다. 이것을 **갈릴레이의 상대성 원리**라고 한다. 다음 활동을 하면서 빛의 속력으로 운동하는 관성 좌표계에 갈릴레이의 상대성 원리를 적용하면 어떤 모순이 생기는지 알아보자.

### 해보기

문제 해결 능력 | 의사 결정 능력

#### 빛의 속력으로 운동할 때의 모순점 사고하기

그림 (가)의 관찰자 A는 거울을 든 채 얼굴을 보고 있고, (나)의 관찰자 B는 거울을 들고 A에 대해 빛의 속력  $c$ 로 등속 운동을 하고 있다.



- 관찰자 B는 거울로 자신의 얼굴을 볼 수 있을까?
- 정지한 관성 좌표계와 운동하는 관성 좌표계를 구별할 수 있는가?
- 위의 상황에서 어떤 모순점이 있는지 설명해 보자.

### 특수 상대성 이론

물체의 상대 속도처럼 빛의 속도도 관측자에 따라 다르게 측정된다면 모순이 생긴다. 특히 서로 다른 속도의 관성 좌표계에서 물리 현상이 달라지므로 갈릴레이의 상대성 원리에 어긋난다. 1905년 아인슈타인은 이러한 모순을 해결하고 상대 운동을 하는 두 관찰자가 측정하는 물리량 사이의 관계를 설명하기 위해 다음과 같은 두 가지 가설을 제시하였다.

**빛의 속도(c)**  
진공에서 빛의 속력은  $3 \times 10^8$  m/s이다.

- 상대성 원리 《 모든 관성 좌표계에서 모든 물리 법칙은 동일하게 성립한다.
- 광속 불변 원리 《 진공 중에서 진행되는 빛의 속력은 모든 관성 좌표계에서 'c'로 같다.

**상대성 원리** | 아인슈타인은 갈릴레이의 상대성 원리를 확장해 모든 관성 좌표계에서는 모든 물리 법칙이 동일하게 성립한다고 가정했다. 따라서 정지한 관성 좌표계와 등속 운동을 하는 관성 좌표계를 구별할 수 없다.

**광속 불변 원리** | 그림 III-46과 같이 도로 중앙선에서 가까워지는 자동차와 멀어지는 자동차에서 비춘 빛의 속력  $c$ 를 관측할 때 갈릴레이 상대성 원리에 의하면  $c$ 보다 크거나 작아야 한다. 그러나 광속 불변 원리에 의하면 정지한 신호등의 불빛과 움직이는 자동차의 불빛은 모두 속력  $c$ 로 동일하다.

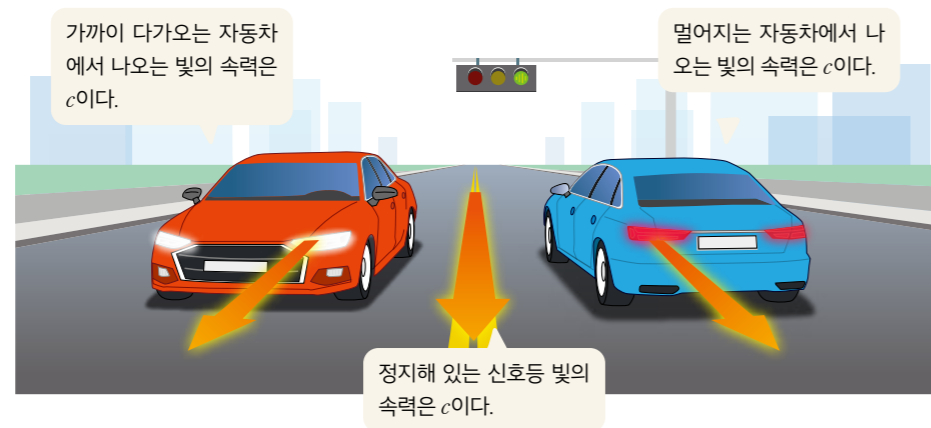


그림 III-46 광속 불변 원리

#### 스스로 확인

- 1 모든 관성 좌표계에서 물리 법칙이 동일하게 적용되는 것을 ( ) 원리라고 한다.
- 2 빛의 속력은 관찰자의 운동 상태와 상관없이 모든 관성 좌표계에서  $c$ 로 동일하다는 것을 ( ) 원리라고 한다.

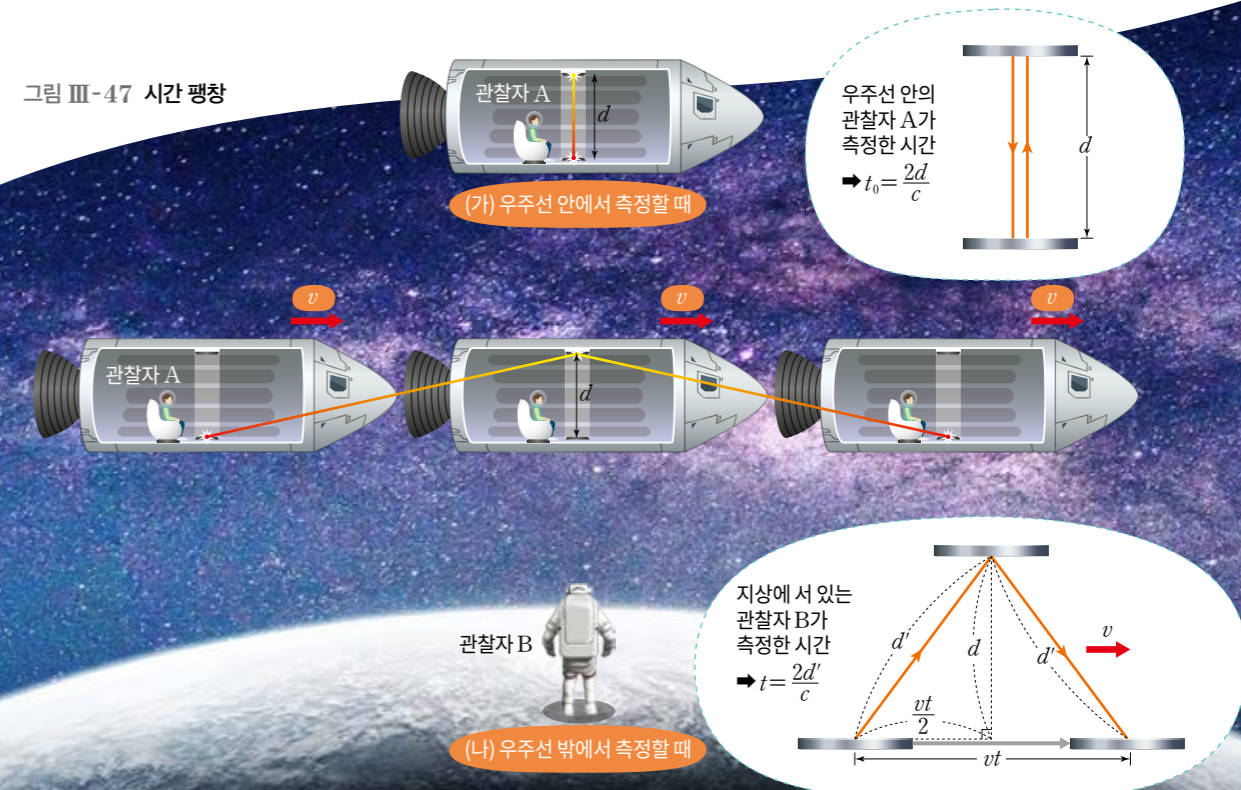
### 시간 팽창

그림 III-47과 같이 빛이 거리  $d$ 인 평행한 두 거울 사이를 왕복하는 데 걸리는 시간을 측정하는 빛 시계를 우주선 안에 설치하고, 우주선 안의 관찰자 A와 우주선 밖의 관찰자 B가 각각 빛 시계를 관찰한다고 가정해 보자.

그림 III-47의 (가)와 같이 우주선 안의 관찰자 A가 빛 시계를 보았을 때 빛이 두 거울 사이를 왕복하는 데 걸린 시간  $t_0 = \frac{2d}{c}$ 이다. 관찰자가 보았을 때 동일한 위치에서 일어나는 두 사건 사이의 시간 간격을 **고유 시간**이라고 하는데, 관찰자 A가 보았을 때 빛이 출발한 사건과 도착한 사건은 같은 위치에서 일어나므로  $t_0$ 은 고유 시간이다.

한편 그림 III-47의 (나)와 같이 우주선 밖의 정지한 관찰자 B가 속력  $v$ 로 운동하는 우주선의 빛 시계를 보면 빛이 비스듬한 경로로 올라갔다 내려오는 것으로 보인다. 빛이 왕복하는 데 걸리는 시간을  $t$ 라고 하면, 그동안 우주선이 이동한 거리는  $vt$ 이다. 빛이 아래쪽 거울에서 위쪽 거울에 도착할 때까지 이동한 거리를  $d'$ 이라고 하면  $t = \frac{2d'}{c}$ 이다. 이때  $d' > d$ 이므로  $t > t_0$ 이다. 즉, 우주선 밖 정지한 관찰자 B가 측정한 두 사건 사이의 시간 간격이 우주선 안 관찰자 A가 측정한 시간 간격보다 길다. 이러한 현상을 **시간 팽창**이라고 한다.

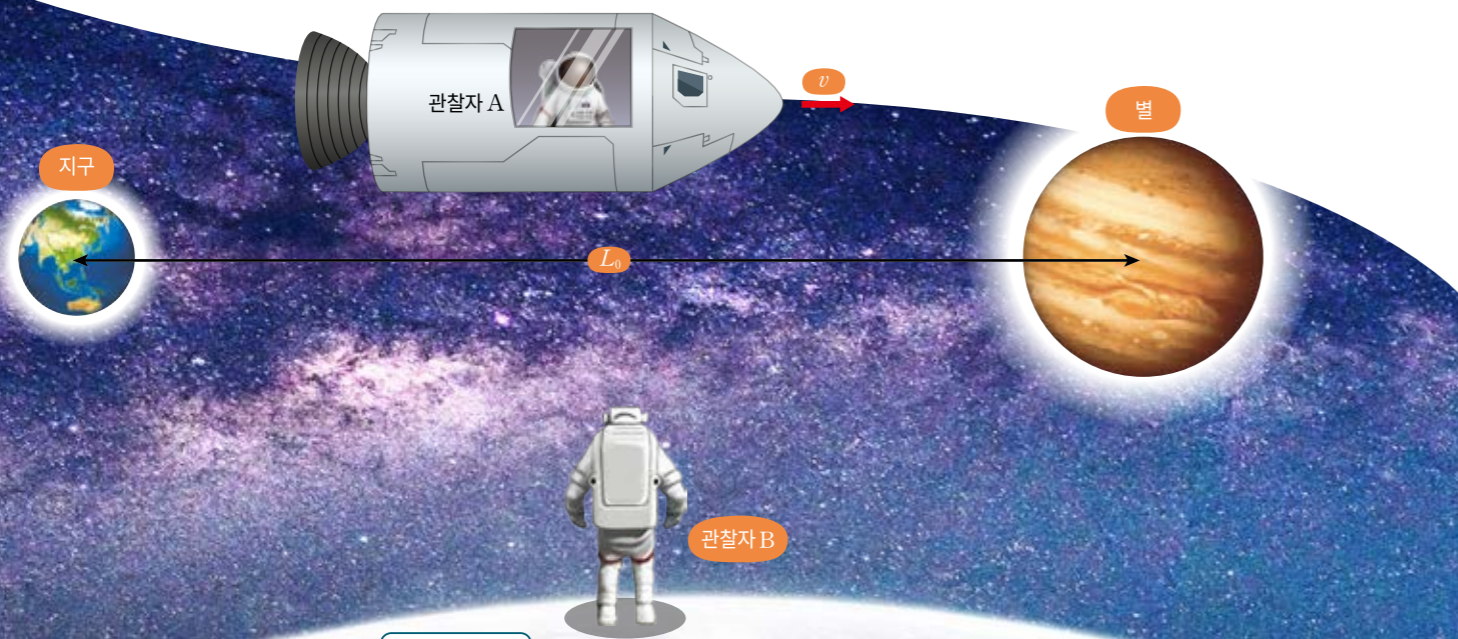
그림 III-47 시간 팽창



### 길이 수축

서로 다른 두 사건의 시간 간격이 관찰자의 운동 상태에 따라 달라지듯이 길이 역시 관찰자에 따라 달라질 수 있다. 한 관성 좌표계에 대해 고정된 두 지점 사이의 길이를 **고유 길이**라고 한다. 그림 III-48과 같이 지구, 별, 관찰자 B는 상대적으로 운동하지 않으며, 관찰자 B가 측정한 거리  $L_0$ 만큼 떨어진 지구와 별 두 지점 사이를 일정한 속도  $v$ 로 운동하는 우주선이 있다고 가정해 보자. 우주선 밖에 정지해 있는 관찰자 B가 지구와 별 두 지점 사이의 길이를 측정할 때, 지구와 별 두 지점이 정지해 있으므로 관찰자 B가 측정한 길이  $L_0$ 은 고유 길이이다. 관찰자 B가 측정한 우주선이 지구에서 별까지 가는 데 걸리는 시간  $t = \frac{L_0}{v}$ 이며, 거리  $L_0 = vt$ 이다. 우주선 안 관찰자 A가 측정한 지구에서 별까지의 거리가  $L$ 이고, 가는 데 걸리는 시간이  $t_0$ 이라면  $t_0 = \frac{L}{v}$ 이며,  $L = vt_0$ 이다. 이때 우주선에서 측정한  $t_0$ 이 고유 시간 이므로 시간 팽창을 고려하면  $t > t_0$ 이다. 따라서  $L_0 > L$ 이다. 즉, 우주선 안의 관찰자 A가 측정한 거리가 우주선 밖의 관찰자 B가 측정한 거리보다 더 짧게 측정되는데, 이 현상을 **길이 수축**이라고 한다. 길이 수축은 물체가 운동하는 방향으로만 일어나며 운동 방향과 수직인 방향으로 나타내지 않는다.

그림 III-48 길이 수축



#### 스스로 확인

- 1 관성 좌표계의 관찰자 A가 상대적으로 운동하는 다른 관성 좌표계의 관찰자 B를 보았을 때, 관찰자 B의 시간이 느리게 가는 현상을 ( ) (이)라고 한다.
- 2 관찰자의 운동 상태와 상관없이 물체의 길이는 일정하게 관측된다. (○, ×)

### 상대성 이론이 가져온 사회적 파급 효과

상대성 이론은 기존의 상식이나 경험에 도전하는 새로운 아이디어를 제시하였다. 다음 활동을 하면서 상대성 이론이 사회에 미친 영향을 알아보자.

#### 해보기

문제 해결 능력 | 의사 결정 능력

#### 상대성 이론이 사회에 미친 영향 발표하기

1. 모둠별로 다음 분야 중 하나를 골라 상대성 이론이 미친 영향을 조사한다.

과학, 기술, 예술, 문화, 사회

2. 조사한 사례 중 하나를 골라 모듬원의 재능을 발휘할 수 있는 방법으로 발표 자료를 만든다.
3. 각 모듬에서 만든 자료를 발표한다.

- 다른 모듬에서 발표한 것 중 가장 인상적인 것을 고르고, 그렇게 생각한 까닭을 써 보자.

**활동 길잡이**  
그림, 노래, 연기, 춤, 시 등 자신의 재능을 발휘해 모듬 활동에 기여할 수 있는 방법을 생각해 활동에 적극적으로 참여한다.

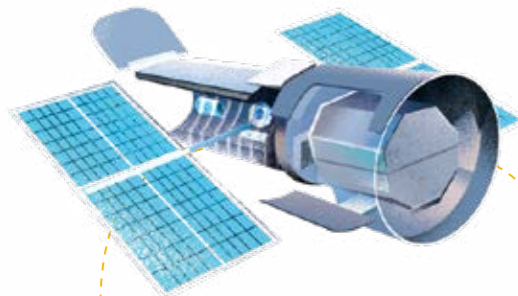
#### 상대성 이론이 미술 분야에 미친 영향

다음은 초현실주의 화가 달리(Dali, S., 1904~1989)의 '시간의 단면,이라는 조각 작품과 마그리트(Magritte, R., 1898~1967)의 '금지된 재현,이라는 그림이다.



- 「시간의 단면,이라는 조각 작품에서 달리는 흘러내리는 시계를 통해 시간의 개념을 새롭게 표현했다.
- 「금지된 재현,이라는 그림에서는 앞모습이 비쳐야 할 거울에 뒷모습이 비친다. 마그리트는 얼굴의 앞뒤가 뒤섞인 그림을 많이 그렸는데, 물체의 길이가 사라져 앞과 뒤가 합쳐지는 공간의 변화를 표현했다.
- 상대성 이론의 영향으로 20 세기에 시간이나 공간을 주제로 한 예술 작품이 많이 발표되었다.





인공위성은 매우 빠른 속도로 지구 주위를 돌기 때문에 상대성 이론에 따라 지구에서와 인공위성에서의 시간이 다르게 흐른다. 위치 정보 시스템(GPS, global positioning system)에서 인공위성의 시간을 보정하지 않으면 오차가 발생해 정확도가 떨어지므로 시간 보정을 통해 정확한 정보를 지상으로 보낸다. 자동차의 내비게이션은 GPS 위성의 신호를 이용해 길을 안내해 준다.

**상대성 이론과 인공위성의 시간 보정**

상대성 이론이 알려지기 전 사람들은 시간이나 공간은 관찰자에 상관없이 일정하고 독립적이라고 생각했다. 그러나 상대성 이론이 널리 알려지게 되면서 시간과 공간에 대한 사람들의 생각을 변화시켰다. 이에 따라 많은 물리 법칙이 상대성 이론에 맞게 수정되었고 나아가 과학과 기술, 예술, 문화, 사회 등 다양한 분야에 큰 영향을 미쳤다.

**상대성 이론과 미술**

20 세기 초반 초현실주의 화가나 미래주의 화가들은 특정한 시점에서의 공간을 표현하는 방법에서 벗어나 시간과 공간을 결합해 하나의 그림에 표현했다. 예를 들어 달리는 사람이나 개를 표현할 때, 연속 사진으로 촬영한 것처럼 하나의 공간에 여러 시점의 모습을 합쳐서 표현했다. 이전 시대의 그림은 특정 시간에 나타난 순간적인 모습만을 표현했지만 미래주의 화가들은 흐르는 시간에 따른 물체의 운동을 하나의 캔버스에 함께 나타냈다.



피카소 (Picasso, P., 1881~1973)

발라 (Balla, G., 1871~1958)

「줄에 매인 개의 움직임」



**스스로 확인**

- 1 초현실주의 화가들의 작품을 통해 상대성 이론에서 운동 상태에 따라 시간이 느려지는 ( )을/를 찾아볼 수 있다.
- 2 빠르게 지구 주위를 도는 GPS 위성은 상대성 이론에 따라 지구와의 ( )간격과 차이가 나기 때문에 이를 보정하는 작업을 거친다.

**스스로 정리**

**공유** 상대성 이론을 주제로 한 노래 가사를 만들어 공유 플랫폼에 공유해 보자.

**상대성 이론과 문학 및 영화**

상대성 이론을 바탕으로 한 다양한 아이디어는 소설이나 영화 등에서 새로운 상상력을 자극하는 소재로 다양하게 활용하고 있다.



**상대성 이론과 원자력 발전**

상대성 이론을 바탕으로 하여 원자핵을 이해하였고, 이는 원자력 발전소의 발명에 영향을 주었다.



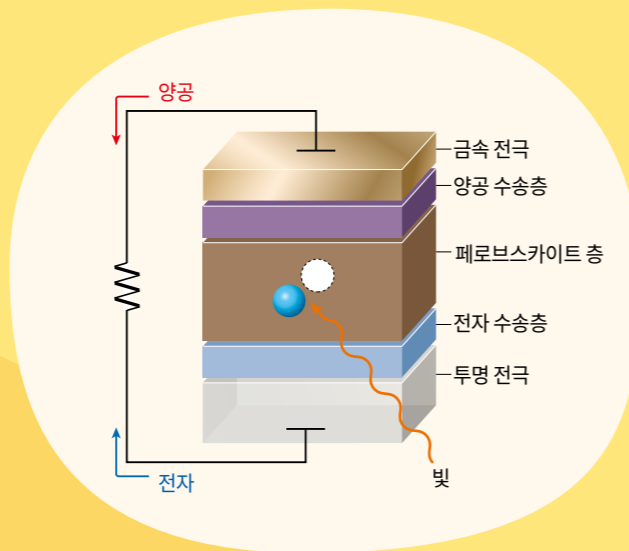
효율을 높여라,

## 3세대 태양 전지

태양 전지는 태양의 빛에너지를 전기 에너지로 전환하는 장치이다. 1세대와 2세대의 태양 전지는 p-n 접합 부분에 태양 빛이 입사하면 광전 효과에 의해 전자가 떨어져 나오면서 전자-양공 쌍이 생성되는데, 이를 이용해 전기를 생산한다. 그런데 이러한 태양 전지의 효율은 31% 정도에 불과하므로 최근에는 경제성, 유연성, 효율성이 좋고 응용 범위가 다양한 3세대 태양 전지를 개발하는 데 힘쓰고 있다. 3세대 태양 전지 중에도 최근 연구 개발이 집중되는 페로브스카이트 태양 전지는 그림과 같이 양공과 전자 수송층 사이에 페로브스카이트 층이 있는 구조이다.

태양 빛이 페로브스카이트 층에 입사하면 빛에너지에 의해 일부 전자가 에너지를 얻어 전자-양공 쌍이 생성된다. 이렇게 생성된 전자-양공 쌍은 페로브스카이트와 수송층 경계면에서 분리되어 각 수송층으로 모이고, 수송층에 모인 전하는 전극에 연결된 도선을 따라 흐른다. 페로브스카이트 태양 전지는 고효율, 낮은 제조 비용,

설계 및 제조 편의성 등 많은 장점이 있고, 다양한 표면에 적용할 수 있는 뛰어난 유연성 때문에 여러 방법으로 응용해 사용할 수 있다. 반면 습도, 열 등 외부 환경 요인에 민감하며, 페로브스카이트 안에 포함된 납을 친환경 물질로 대체할 방안을 찾아야 하는 등 아직 해결해야 할 문제도 남아 있다.



▲ 페로브스카이트 태양 전지의 구조와 원리

글쓰기

다양한 3세대 태양 전지를 조사해 보고, 우리 집에 설치한다면 어떤 태양 전지가 효율적일지 글로 써 보자.



## 쌍둥이 역설, 어떻게 시작했을까

1895년 로런츠(Lorentz, H. A., 1853~1928)는 빛의 속도가 모든 관측자에게 동일하다는 생각으로부터 시간과 공간이 상대적으로 변화함을 제안해 ‘쌍둥이 역설’의 초기 형태를 제시했다. 1905년 아인슈타인은 「움직이는 물체의 전기역학에 대하여」라는 논문을 통해 정지한 관성계에 대해 빠르게 운동하는 관성계에서는 시간이 느리게 흐른다는 생각을 발표했다.

쌍둥이 A와 B 중 A는 지구에 남고 B만 우주선을 타고 우주여행을 다녀왔을 때 A와 B의 나이는 어떻게 변할까? A의 입장에서 B는 매우 빠른 우주선을 타고 왔으므로 B의 시간이 천천히 흘러 A의 나이가 더 많아진다. B의 입장에서는 A가 있는 지구가 우주선으로부터 빠르게 멀어졌다가 돌아온 것이므로 B의 나이가 더 많아진다.

이러한 모순은 우주선이 여행을 갔다가 왔기 때문에 나타난다. 즉, 우주선을 관성계라고 할 수 없기 때문이다. 쌍둥이 역설은 1916년 아인슈타인이 특수 상대성 이론을 확장한 일반 상대성 이론을 발표함으로써 해결할 수 있었다. 나아가 일반 상대성 이론은 인류가 시공간과 우주를 더 깊게 이해하는 데 기여했다.

글쓰기

일반 상대성 이론은 ‘역학과 에너지’ 과목에서 배운다. 일반 상대성 이론을 배운다면 어떤 점을 더 알고 싶은지 생각해 글로 써 보자.

