

특수 상대성 이론

차례

Part 1 · 개념 정리 1
갈릴레이의 상대성 원리 1
특수 상대성 이론의 두 가지 가설 4
시간 팽창과 길이 수축 7
Part 2 · 기본 문제 15
Part 3 · 심화 문제 17
Part 4 · 정답과 해설 22
개념 체크 정답 22
기본 문제 해설 23
심화 문제 해설 25

Part 1 · 개념 정리

1 갈릴레이의 상대성 원리

달리는 자동차의 속도는 길가에 정지한 사람이 볼 때와 다른 달리는 자동차에서 볼 때의 속도가 다르다. 이처럼 관찰자가 어떤 운동을 하고 있는지에 따라 같은 물체의 운동이 서로 다르게 관측된다. 그렇다면 관찰자의 운동 상태에 따라 빛도 다르게 관측되는지 알아보자.

1. 좌표계

물체의 위치를 숫자로 나타내기 위해 마련된 틀, 즉 기준을 의미한다.

(1) **관성 좌표계(관성계)**: 관성 법칙이 성립하는 좌표계로, 물체가 힘을 받지 않으면 가속되지 않는 좌표계를 말한다. 관성 법칙이 성립하는 좌표계에서는 가속도 법칙(뉴턴 제2법칙)도 성립하므로, 운동 방정식으로 물체의 운동을 표현할 수 있다. 한 관성 좌표계에 대해 정지해 있거나 등속도 운동을 하는 좌표계는 모두 관성 좌표계이다.

(2) **가속 좌표계**: 한 관성 좌표계에 대해 가속도 운동을 하는 좌표계를 말한다. 가속 좌표계에서 운동하는 물체는 마치 어떤 가상의 힘을 받는 것처럼 보이는데, 이와 같이 좌표계의 가속도 운동 때문에 관찰되는 가상의 힘을 **관성력**이라고 한다. 따라서 가속 좌표계에서는 관성 법칙이 성립하지 않으며, 관성력을 고려해야만 뉴턴 법칙을 적용할 수 있다.

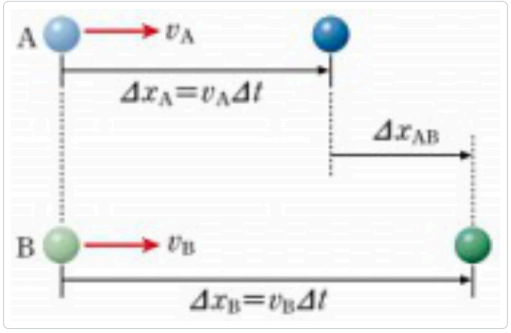
> **관성 좌표계와 특수 상대성 이론** 특수 상대성 이론은 관성 좌표계 사이에서 일어나는 현상을 다룬다. 가속 좌표계에서 일어나는 현상은 일반 상대성 이론에서 다룬다.
> **갈릴레이(Galilei, G., 1564~1642)** 이탈리아의 물리학자이자 천문학자, 철학자이다. 물체의 운동을 연구하여 관성 법칙과 낙하하는 물체의 가속도가 일정하다는 사실 등을 밝혔다.

개념 체크 A 빈칸을 채우고, ○ 또는 ×로 답하시오. (정답은 교재 말미 해설)

1. 관성 법칙이 성립하는 좌표계로, 물체가 힘을 받지 않으면 가속되지 않는 좌표계를 _____ 라고 한다.
2. 가속 좌표계에서 좌표계의 가속도 운동 때문에 관찰되는 가상의 힘을 _____ 이라고 한다.
3. 한 관성 좌표계에 대해 등속도 운동을 하는 좌표계는 관성 좌표계가 아니다. ( )
4. 가속 좌표계에서는 관성력을 고려해야만 뉴턴 법칙을 적용할 수 있다. ( )

2. 갈릴레이의 상대성 원리

(1) **상대 속도**: 그림은 물체 A와 B가 한 좌표계에서 속도 v_A, v_B로 운동하는 것을 나타낸 것이다. 이 좌표계에서 시간 Δt 동안 A, B가 이동한 거리는 $\Delta x_A = v_A \Delta t$, $\Delta x_B = v_B \Delta t$이다.



A가 관찰하였을 때 Δt 동안 B가 이동한 거리는 $\Delta x_{AB} = \Delta x_B - \Delta x_A = v_B \Delta t - v_A \Delta t = (v_B - v_A)\Delta t$이므로 이를 정리하면 $\frac{\Delta x_{AB}}{\Delta t} = v_B - v_A$의 결과를 얻을 수 있다.

이 결과를 A에 대한 B의 **상대 속도**라고 한다. 즉, 하나의 동일한 기준 좌표계에서 측정한 A와 B의 속도가 각각 v_{A}, v_{B}일 때, A에 대한 B의 (상대) 속도 또는 A가 관찰한 B의 (상대) 속도 v_{AB}는 다음과 같다.

$$v_{\mathrm{AB}} = v_{\mathrm{B}} - v_{\mathrm{A}}$$

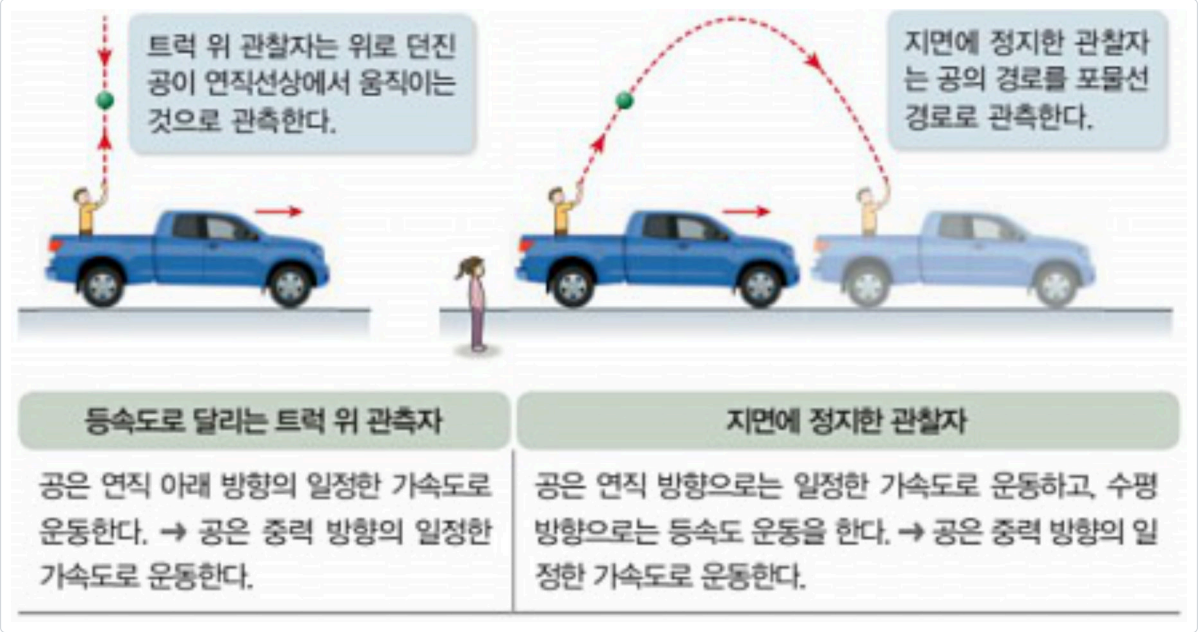
상대 속도 'A에 대한 B의' 또는 'A가 관찰한 B의'라는 말이 있으면 '상대'라는 말 없이 속도라고만 하여도 상대 속도를 나타낸다.

(2) **갈릴레이의 상대성 원리**

① 물체의 운동을 서로 다른 관성 좌표계에 있는 관찰자가 관측하였을 때 물체의 속도는 관측하는 관성 좌표계에 따라 다르게 측정되지만, 물체의 가속도는 동일하게 측정된다. 즉, 관성 좌표계마다 관찰하는 현상은 다르지만 물체의 운동을 설명하는 운동 법칙은 서로 다른 관성 좌표계에서 동일하게 적용된다.

갈릴레이의 상대성 원리 모든 관성 좌표계에서 운동 법칙은 동일하게 적용된다.

② 등속도 운동을 하는 관찰자와 지면에 정지한 관찰자가 관측하는 공의 운동 비교



개념 체크 B 빈칸을 채우고, ○ 또는 ×로 답하시오. (정답은 교재 말미 해설)

1. 하나의 기준 좌표계에서 측정한 A와 B의 속도가 각각 v_{A}, v_{B}일 때, A에 대한 B의 상대 속도는 $v_{\mathrm{AB}} =$ _____ 이다.
2. 갈릴레이의 상대성 원리에 따르면 모든 관성 좌표계에서 _____ 은 동일하게 적용된다.
3. 서로 다른 관성 좌표계에 있는 관찰자가 같은 물체의 운동을 관측하면 물체의 가속도는 동일하게 측정된다. ( )
4. 등속도로 달리는 트럭 위의 관찰자가 볼 때, 위로 던진 공은 포물선 경로로 운동한다. ( )

3. 갈릴레이의 상대성 원리와 빛의 속력

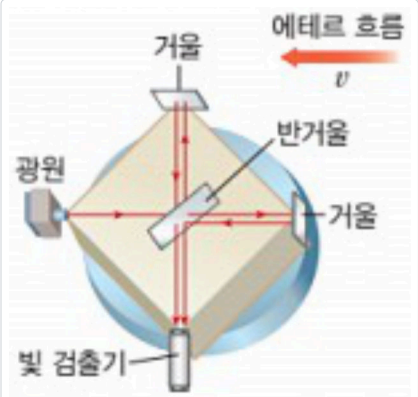
(1) **마이컬슨·몰리 실험**: 빛의 파동성이 확인되었을 때 물리학자들은 빛을 전달하는 매질(에테르)을 발견하기 위해 많은 노력을 기울였다. 마이컬슨과 몰리는 지구가 에테르로 채워진 우주 공간을 매우 빠른 속력으로 움직이므로, 지구에서 측

정하는 빛의 속력이 에테르의 이동 방향과 나란하게 진행할 때와 수직으로 진행할 때 속력 차이가 생길 것으로 예상하였으나 실제로는 빛의 속력 차이를 관측할 수 없었다.

(2) **갈릴레이의 상대성 원리와 빛의 속력**: 갈릴레이의 상대성 원리에 따르면 빛의 속력은 관찰자의 운동에 따라 다르게 측정되어야 하지만, 빛의 속력은 모든 관성 좌표계에서 같게 측정되었다.

> **에테르** 물결파는 물이라는 매질을 통해 전달되고, 소리는 공기라는 매질을 통해 전달되는 것처럼, 빛이라는 파동을 전달시킨다고 생각했던 가상의 매질이다. 빛이 진공 중에서도 전달되는 것으로 보아, 에테르는 물질이 텅 빈 진공에도 채워져 있고, 물체의 운동에 거의 영향을 주지 않는 물질이라고 생각하였다.

> **마이컬슨·몰리의 실험 장치와 결과** 결과적으로 마이컬슨·몰리 실험은 에테르의 존재를 밝히는 데 실패하며, 빛이 매질 없이 전파되는 파동임을 결론지었으며, 빛의 속력이 모든 관성 좌표계에서 같음을 확인하였다.



▲ 마이컬슨·몰리 실험 장치

개념 체크 C 빈칸을 채우고, ◯ 또는 ×로 답하시오. (정답은 교재 말미 해설)

1. 물결파의 물, 소리의 공기처럼 빛이라는 파동을 전달시킨다고 생각했던 가상의 매질을 _____ 라고 한다.
2. 마이컬슨·몰리 실험 결과 빛은 _____ 없이 전파되는 파동임이 결론지어졌다.
3. 마이컬슨·몰리 실험에서는 빛이 진행하는 방향에 따라 빛의 속력 차이가 관측되었다. ( )
4. 갈릴레이의 상대성 원리에 따르면 빛의 속력은 관찰자의 운동에 따라 다르게 측정되어야 한다. ( )

2 특수 상대성 이론의 두 가지 가설

아인슈타인은 빛의 속력에 대해서 고전 역학과 전자기학의 예측 사이에 모순이 있음을 인식하고, 두 가지 가설을 도입하여 두 이론을 조화시키며 특수 상대성 이론을 제안하였다.

1. 갈릴레이의 상대성 원리의 한계

갈릴레이의 상대성 원리를 전자기 현상에 적용해 보면 여러 가지 이상한 일이 일어난다. 빛의 속력은 유한하므로 빛과 동일한 속도로 움직이는 좌표계에서 본다면 빛이 정지해야 한다는 것이다. 그러나 당시 알려져 있던 전자기학에서 빛의 속력은 어떤 좌표계에서 보아도 동일하였으며, 이는 마이컬슨·몰리 실험에서도 확인되었다. 따라서 '정지한 빛'은 없으며, 빛(전자기파)에는 갈릴레이의 상대성 원리를 적용할 수 없었다.

2. 아인슈타인의 특수 상대성 이론의 두 가지 가설

아인슈타인은 빛도 상대성 원리에 따라야 한다고 생각하고, 다음과 같은 두 가지 가설을 기본으로 하는 특수 상대성 이론을 완성하였다.

[가설 1] 상대성 원리 모든 관성 좌표계에서 물리 법칙은 동일하게 성립한다.
[가설 2] 광속 불변 원리 진공 중에서 진행하는 빛의 속력은 모든 관성 좌표계에서 모든 방향에 대하여 c로 같다.

> **아인슈타인(Einstein, A., 1879~1955)** 미국(독일 태생)의 이론 물리학자로, 상대성 이론(상대론)과 광양자 이론으로 유명하다. 1921년에 광전 효과 연구의 업적을 인정받아 노벨 물리학상을 수상하였다.
> **광속(c)** 빛의 속력을 말한다. 진공에서의 빛의 속력은 $c = 299792458\ \mathrm{m/s} \approx 3 \times 10^8\ \mathrm{m/s}$이다. 광속 c는 모든 관찰자에게 일정하기 때문에, 물리학에서는 c를 상수로 본다.

(1) **상대성 원리**: 아인슈타인의 상대성 원리는 뉴턴 역학 법칙에만 제한되었던 갈릴레이의 상대성 원리를 전자기학, 광학, 열역학을 비롯한 모든 물리 법칙으로 일반화한 것이다.

① 의미: 관성 좌표계에서 관찰자가 자연 현상을 설명하는 물리 법칙은 모두 동일해야 한다. 또한 물체의 속력을 정하는 기준은 절대적이지 않고, 운동하는 모든 물체의 속력은 상대적이다.



▲ **지구의 관찰자 S와 지구에 대해 속력 v로 등속도 운동하는 우주선 안의 관찰자 S′이 관측하는 상대적 운동** 정지 상태와 등속도 운동 상태는 본질적으로 서로 구분할 수 없다.

② 시공간의 상대성: 상대성 원리에 대해 갈릴레이와 뉴턴은 두 관찰자의 공간에 대한 상대성만을 고려하였다. 그런데 아인슈타인은 공간뿐만 아니라 시간에 대한 상대성도 고려해야 한다고 하였고, 이를 통해 3차원 공간 좌표에 시간이 포함된 4차원 시공간 좌표를 완성하여 상대성 원리가 성립함을 증명하였다.

개념 체크 D 빈칸을 채우고, ○ 또는 ×로 답하시오. (정답은 교재 말미 해설)

1. 아인슈타인의 상대성 원리는 뉴턴 역학 법칙에만 제한되었던 갈릴레이의 상대성 원리를 전자기학, 광학, 열역학을 비롯한 모든 _____ 으로 일반화한 것이다.
2. 아인슈타인은 3차원 공간 좌표에 시간이 포함된 _____ 차원 시공간 좌표를 완성하여 상대성 원리가 성립함을 증명하였다.
3. 빛의 속력은 유한하므로, 빛과 동일한 속도로 움직이는 좌표계에서 보면 빛이 정지해 있는 것으로 관측된다. ( )
4. 상대성 원리에 따르면 정지 상태와 등속도 운동 상태는 본질적으로 서로 구분할 수 없다. ( )

(2) **광속 불변 원리**: 마이컬슨·몰리 실험에서 빛의 속력이 관찰자의 운동과 무관하게 같은 값으로 측정되어서 도입된 가설이다. 아인슈타인은 직관에 의해 광속 불변 원리를 생각하였지만, 광속의 99.975 %의 속력으로 운동하는 중성 파이온이 방출하는 감마(γ)선의 속력을 측정함으로써 이 가설은 사실로 증명되었다.

① 의미: 진공 중에서 진행하는 빛의 속력은 자연계의 기본 상수이므로 관찰자의 운동 상태와 관계없이 모두 광속 c로 같아야 한다는 것이다.

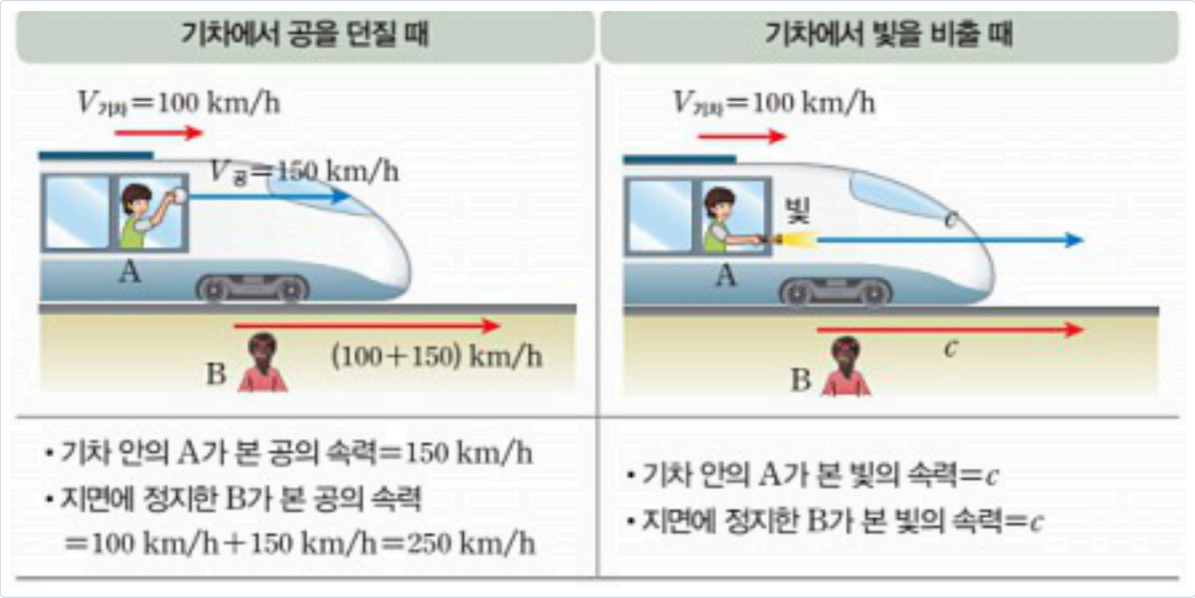


▲ **광속 불변 원리** 진행하는 빛에 대해 관찰자가 정지해 있든, 빛의 진행 방향 또는 진행 방향과 반대 방향으로 운동하든 빛의 속력은 c이다.

속력의 측정에는 시간과 길이의 측정이 필요하다. 즉, 어느 관찰자에게나 빛의 속력이 같게 측정된다는 것은 공간뿐만 아니라 시간조차도 빛의 속력에 맞추어 변화될 수 있음을 의미한다.

> **광속 불변 원리의 실험적 검증** 움직이는 광원으로부터 나온 전자기파의 속력이 광속과 일치하는지 알아보기 위해 입자 가속기에서 생성된 중성 파이온이 방출하는 감마(γ)선의 속력을 측정하였는데, 측정 결과 전자기파의 속력이 빛의 속력과 같았다. 이 실험 결과는 빛의 속력의 99 %로 운동하는 물체(파이온)에서 빛(감마(γ)선)을 쏘아도 빛의 속력은 c로 측정됨을 보여 줌으로써 광속 불변 원리를 입증하였다.

② 고전 역학과의 차이: 그림과 같이 100 km/h의 속력으로 달리는 기차에서 150 km/h의 속력으로 던진 공의 속력을 관찰자 A는 150 km/h로, 관찰자 B는 250 km/h로 서로 다르게 측정한다. 그런데 빛을 비추는 경우는 그렇지 않다. 갈릴레이의 상대성 원리에서 B가 본 빛의 속력은 100 km/h+c가 되어야 하지만, 아인슈타인의 광속 불변 원리에 의하면 B가 본 빛의 속력도 c가 되며, 이를 바탕으로 뉴턴 역학과 차이가 있는 시공간의 새로운 개념이 도입되었다.



갈릴레이 이론과 특수 상대성 이론의 비교

구분	갈릴레이 이론	특수 상대성 이론
상대성 원리	모든 관성계에서 측정한 물리 법칙은 같다.	
	뉴턴 역학에만 제한됨.	모든 물리 영역으로 일반화함.
빛의 속력	빛의 속력은 상대 속도에 따라 다르다.	빛의 속력은 항상 c로 같다. → 광속 불변 원리
길이, 시간 등 물리량	모든 관성 좌표계에서 물리량은 같다.	물리량은 관찰자의 상대 속도에 따라 다르다.

개념 체크 E 빈칸을 채우고, ○ 또는 ×로 답하시오. (정답은 교재 말미 해설)

1. 진공 중에서 진행하는 빛의 속력은 모든 관성 좌표계에서 모든 방향에 대하여 c로 같다는 가설을 _____ 원리라고 한다.
2. 100 km/h로 달리는 기차에서 앞쪽으로 빛을 비출 때, 지면에 정지한 관찰자가 측정한 빛의 속력은 _____ 이다.
3. 광속 불변 원리는 광속에 가까운 속력으로 운동하는 중성 파이온이 방출하는 감마(γ)선의 속력을 측정함으로써 사실로 증명되었다. ( )
4. 특수 상대성 이론에서 길이, 시간 등의 물리량은 모든 관성 좌표계에서 같다. ( )

3 시간 팽창과 길이 수축

특수 상대성 이론에 따르면 모든 관성 좌표계에서 빛의 속력이 항상 같게 측정되어야 하므로 속력의 측정에 필요한 시간과 길이의 측정도 관성 좌표계에 따라 달라져야 한다.

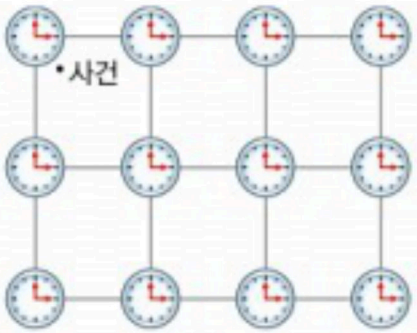
1. 사건의 측정

특수 상대성 이론에서는 어떤 일이 일어나는 것을 **사건**이라고 한다. 상대성 이론에서는 공간과 시간이 서로 얽혀 있기 때문에, 관찰자가 사건을 기술할 때는 사건이 발생한 시간과 위치의 좌표로 나타내므로 특수 상대성 이론에서 사건이란 특정한 시각에 특정한 위치에서 일어나는 일을 의미한다.

심화 시간의 동기화

① 사건의 시간 측정 문제: 사건이 발생한 시점과 그 사건을 관찰한 시점이 서로 다를 수 있다. 예를 들어 어떤 지점에서 전구에 불을 켤 때 빛이 관찰자에게 도달하는 시간이 있으므로 멀리 떨어진 관찰자일수록 전구가 켜진 시간을 늦게 측정하게 된다.

② 시공간 좌표를 이용한 시간의 동기화: 특수 상대성 이론에서는 이러한 혼동을 피하기 위해 그림과 같이 공간 좌표의 각 격자점마다 작은 시계를 고정시킨 다음, 사건이 발생했을 때 사건이 발생한 격자점의 시계를 사용함으로써 동일한 관성 좌표계에 있는 관찰자는 위치와 관계없이 동일한 사건의 발생 시간을 동일하게 측정할 수 있게 하였다.



▲ 일정 간격으로 시계를 고정한 시공간 좌표

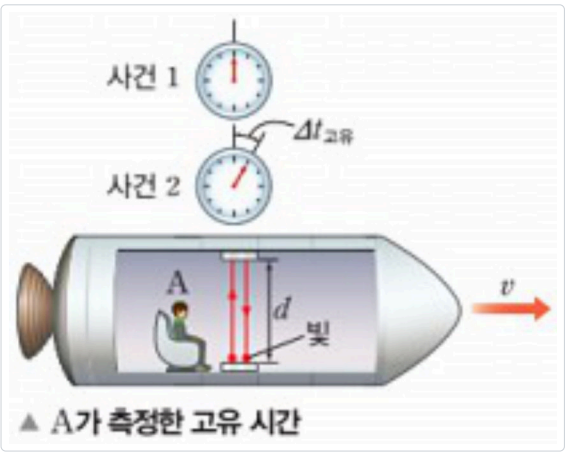
2. 시간 팽창(시간 지연)

특수 상대성 이론에 따르면 서로 다른 관성 좌표계에서 측정한 두 사건 사이의 시간 간격은 일반적으로 서로 다르다. 가상의 빛 시계라는 도구를 이용하면 이 현상을 설명할 수 있다.

(1) **우주선 안의 관찰자가 측정한 시간(고유 시간)**

① **고유 시간**: 관성 좌표계의 같은 위치에서 일어난 두 사건 사이의 시간 간격

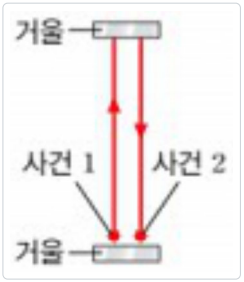
② 그림과 같이 일정한 속력 v로 운동하는 우주선 안에 놓인 빛 시계를 우주선 안의 관찰자 A가 보았을 때, 빛이 방출되는 사건 1과 빛이 돌아오는 사건 2는 같은 위치에서 일어나므로 A가 측정한 시간은 고유 시간이다. 거울 사이의 간격이 d일 때 빛이 왕복하는 데 걸린 고유 시간 $\Delta t_{고유}$를 측정하면 다음과 같다.



▲ A가 측정한 고유 시간

$$\Delta t_{\text{고유}} = \frac{2d}{c}$$

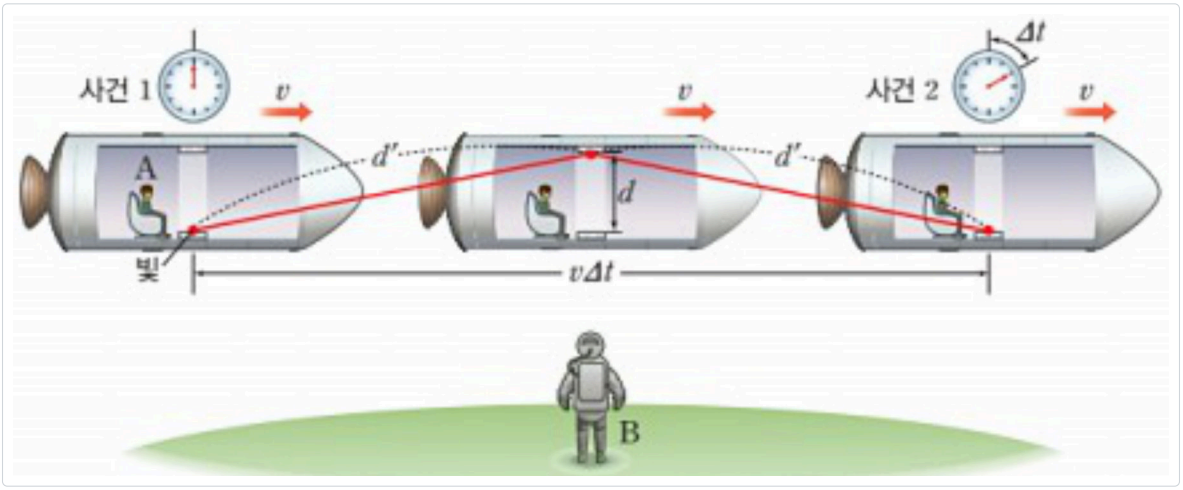
빛 시계 위와 아래에 설치된 거울 사이를 빛이 반사하며 진공에서의 광속 c로 왕복하도록 만든 시계이다. 광속 불변 원리에 따라 빛의 속력은 항상 일정하므로 이를 이용하여 빛이 한 번 왕복하는 데 걸린 시간을 단위로 시간을 측정하는 가상의 시계이다.



개념 체크 F 빈칸을 채우고, ○ 또는 ×로 답하시오. (정답은 교재 말미 해설)

1. 특수 상대성 이론에서 특정한 시각에 특정한 위치에서 일어나는 일을 _____ 이라고 한다.
2. 관성 좌표계의 같은 위치에서 일어난 두 사건 사이의 시간 간격을 _____ 이라고 한다.
3. 거울 사이의 간격이 d인 빛 시계에서 빛이 한 번 왕복하는 데 걸린 고유 시간은 $\frac{2d}{c}$이다. ( )
4. 어떤 사건이 발생한 시점과 그 사건을 관찰한 시점은 관찰자의 위치와 관계없이 항상 같다. ( )

(2) **우주선 밖의 정지한 관찰자가 측정한 시간**



그림과 같이 우주선 밖의 정지한 관찰자 B가 우주선 안의 빛 시계를 관측하면, 빛 시계는 우주선과 함께 운동하므로 빛이 방출되는 사건 1이 일어난 위치와 빛이 돌아오는 사건 2가 일어난 위치가 다르다. B가 보았을 때 빛이 움직인 거리는 $2d'$이고 빛의 속력은 c로 일정하므로, B가 본 빛의 왕복 시간 Δt는 다음과 같다.

$$\Delta t = \frac{2d'}{c}$$

(3) **두 관찰자가 측정한 시간 비교**

① $d < d'$이므로 $\frac{2d}{c} < \frac{2d'}{c}$이다. 따라서 $\Delta t_{\text{고유}} < \Delta t$이다.

② 빛 시계에 대해 움직이는 관찰자가 측정한 시간 간격 Δt는 빛 시계에 대해 정지한 관찰자가 측정한 고유 시간 $\Delta t_{\text{고유}}$보다 길다.

③ 우주선의 속력이 빠를수록 d'이 크므로 $\Delta t - \Delta t_{\text{고유}}$도 크다.

(4) **시간 팽창(시간 지연)**: 한 관성 좌표계의 관찰자가 상대적으로 빠르게 운동하는 다른 관성 좌표계의 시간을 측정하면 시간이 천천히 가는 것으로 관찰된다.

① 관성 좌표계의 같은 장소에서 두 사건이 발생했을 때, 다른 관성 좌표계에서 측정한 두 사건 사이의 시간 간격은 항상 고유 시간보다 늘어난다.

② 한 관성 좌표계에 대해 다른 관성 좌표계의 속력이 빠를수록 시간 팽창 정도가 크다.

개념 체크 G 빈칸을 채우고, ○ 또는 ×로 답하시오. (정답은 교재 말미 해설)

1. 한 관성 좌표계의 관찰자가 상대적으로 빠르게 운동하는 다른 관성 좌표계의 시간을 측정하면 시간이 _____ 가는 것으로 관찰된다.
2. $\gamma = 1/\sqrt{1-v^2/c^2}$을 _____ 라고 한다.
3. 빛 시계에 대해 움직이는 관찰자가 측정한 시간 간격은 빛 시계에 대해 정지한 관찰자가 측정한 고유 시간보다 짧다. ( )
4. 한 관성 좌표계에 대해 다른 관성 좌표계의 속력이 빠를수록 시간 팽창 정도가 크다. ( )

심화 시간 팽창의 정량적 해석

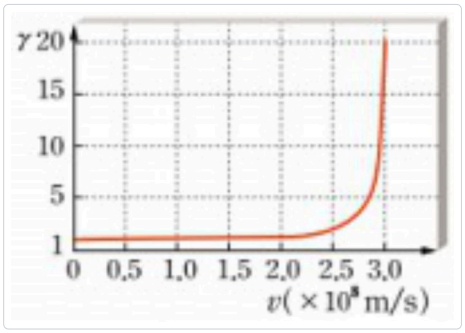
위와 같은 상황에서 관찰자 A, B가 측정한 시간은 각각 $\Delta t_{고유}=\frac{2d}{c}$, $\Delta t=\frac{2d'}{c}$이다. 이때 Δt 동안 우주선이 이동한 거리가 $v\Delta t$이므로 d'은 피타고라스 정리에 의해 $d'=\sqrt{\left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2+d^2}$이다. $\Delta t_{고유}$와 d'을 이용하여 Δt를 정리하면 다음과 같다.

$$\Delta t=\frac{2d'}{c}=\frac{2}{c}\sqrt{\left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2+d^2}=\frac{2}{c}\sqrt{\left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2+\left(\frac{c\Delta t_{고유}}{2}\right)^2}$$

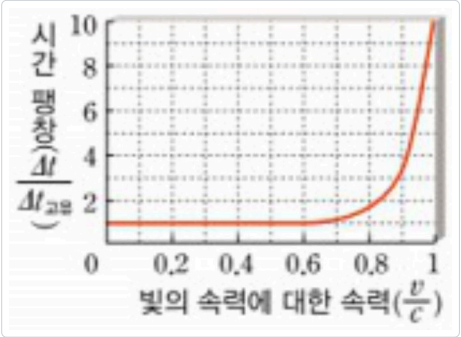
$$(\Delta t)^2=\frac{v^2}{c^2}(\Delta t)^2+(\Delta t_{고유})^2 \qquad \therefore \Delta t=\frac{\Delta t_{고유}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

우주선의 속력 v는 c보다 느리므로, $\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}>1$이다. 따라서 $\Delta t>\Delta t_{고유}$이다.

로런츠 인자(γ) $\gamma=\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$을 로런츠 인자라고 한다. 속력이 매우 느린 좌표계에서는 거의 1이 되어 상대성 이론의 효과를 관측하기 어렵다. 그러나 속력 v가 빛의 속력에 접근함에 따라 γ는 급격하게 증가한다.



관찰자의 상대 속력에 따른 시간 팽창 물체의 속력 v가 빛의 속력 c에 가까워질수록 시간 팽창 정도가 커진다.



3. 길이 수축

특수 상대성 이론에 따르면 서로 다른 관성 좌표계에서 측정한 두 지점 사이의 거리도 일반적으로 서로 다르다. 광속에 가까운 일정한 속력 v로 이동하는 우주선과 지구에서 각각 지구에서 다른 별까지의 거리를 측정하여 이 현상을 설명한다.

(1) **우주선 밖에 정지해 있는 관찰자가 측정한 길이(고유 길이)**

① **고유 길이**: 한 관성 좌표계에 대해 위치가 변하지 않고 고정된 두 지점 사이의 길이

② 지구에 정지해 있는 관찰자 B는 우주선이 지구에서 별까지 이동하는 데 걸린 시간에 우주선의 속력을 곱해서 지구와 별 사이의 거리를 구할 수 있다.



B가 측정한 시간(Δt)	B가 측정한 지구와 별 사이의 거리($L_{고유}$)
B의 좌표계에서 우주선이 출발한 사건과 도착한 사건은 서로 다른 장소에서 일어나므로 Δt는 고유 시간이 아니다.	지구와 별이 B에 대해 정지해 있으므로 B는 지구와 별 사이의 고유 길이를 측정하며, 우주선의 속력이 v이므로 $L_{고유}=v\Delta t$이다.

(2) **우주선 안의 관찰자가 측정한 길이**: 우주선 안의 관찰자 A는 지구와 별이 자신의 우주선을 v의 일정한 속력으로 지나가는 것으로 관측한다. A는 지구와 별이 자신의 우주선을 지나가는 데 걸린 시간에 지구와 별의 속력 v를 곱해 지구와 별 사이의 거리를 구할 수 있다.



A가 측정한 시간($\Delta t_{고유}$)	A가 측정한 지구와 별 사이의 거리(L)
A의 좌표계에서는 지구가 우주선을 지나가는 사건과 별이 우주선을 지나가는 사건이 같은 장소에서 일어나므로 $\Delta t_{고유}$는 고유시간이다.	지구와 별이 A에 대해 v의 속력으로 움직이므로 A가 측정한 지구와 별 사이의 거리 L은 고유 길이가 아니며, $L=v\Delta t_{고유}$이다.

> **로런츠 인자를 이용한 길이 수축의 정량적 해석** 시간 $\Delta t_{고유}$는 $\Delta t=\dfrac{\Delta t_{고유}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$의 관계가 있으므로, A가 측정한 지구와 별 사이의 거리 L은 $L=v\Delta t_{고유}=v\Delta t\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$, 즉 $L=L_{고유}\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$이다. 우주선의 속력 v는 c보다 느리므로 $\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}<1$이고, $L<L_{고유}$이다.

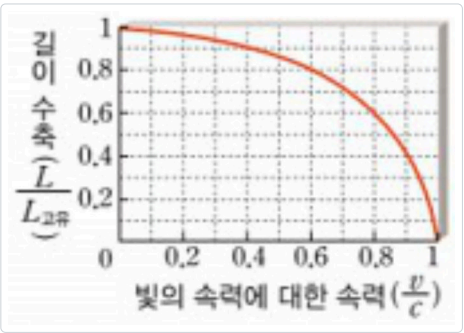
(3) **두 관찰자가 측정한 거리 비교**

① $\Delta t>\Delta t_{고유}$이므로 $v\Delta t>v\Delta t_{고유}$이다. 따라서 $L_{고유}>L$이다.

② 지구와 별에 대해 움직이는 관찰자가 측정한 지구와 별 사이의 거리 L은 지구와 별에 대해 정지한 관찰자가 측정한 지구와 별 사이의 고유 길이 $L_{고유}$보다 작다.

③ 우주선의 속력이 빠를수록 $v\Delta t-v\Delta t_{고유}$가 크다.

> **관찰자의 상대 속력에 따른 길이 수축** 물체의 속력 v가 빛의 속력 c에 가까워질수록 길이 수축 정도가 커진다.

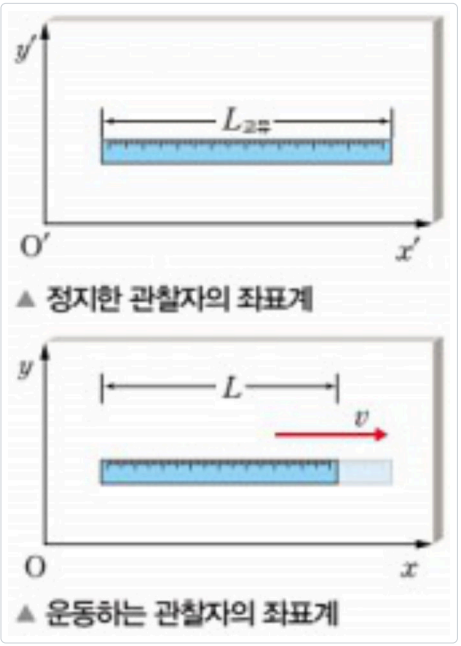


(4) **길이 수축**: 관찰자가 상대적으로 빠르게 운동하는 물체를 보면 운동 방향으로 길이가 줄어든 것으로 보인다. → 길이 수축은 운동 방향에 대해서만 나타나며, 운동 방향에 수직인 방향으로는 일어나지 않는다.

① 물체에 대해 측정하려는 길이의 방향으로 운동하는 다른 관성 좌표계에서 측정한 물체의 길이는 고유 길이보다 짧다.

② 한 관성 좌표계에 대해 다른 관성 좌표계의 속력이 빠를수록 길이 수축 정도가 크다.

고유 길이와 길이 수축 관성 좌표계에 대해 정지한 관찰자가 측정한 막대의 길이가 고유 길이 $L_{고유}$일 때, 정지한 관찰자에 대해 일정한 속력 v로 운동하는 관찰자가 측정한 막대의 길이 L은 $L_{고유}$보다 짧다.



▲ 정지한 관찰자의 좌표계

▲ 운동하는 관찰자의 좌표계

개념 체크 H 빈칸을 채우고, ○ 또는 ×로 답하시오. (정답은 교재 말미 해설)

1. 한 관성 좌표계에 대해 위치가 변하지 않고 고정된 두 지점 사이의 길이를 _____ 라고 한다.
2. 관찰자가 상대적으로 빠르게 운동하는 물체를 보면 _____ 방향으로 길이가 줄어든 것으로 보인다.
3. 길이 수축은 운동 방향에 수직인 방향으로도 일어난다. ( )
4. 지구에 대해 광속에 가깝게 운동하는 우주선 안의 관찰자가 측정한 지구와 별 사이의 거리는 고유 길이보다 짧다.( )

분석 특수 상대성 이론의 증거 – 뮤온의 관측

뮤온은 우주에서 날아오는 입자가 상공 10 km 정도 높이에서 대기권의 입자와 충돌하여 만들어지는 입자로, 광속에 가깝게 움직인다. 뮤온은 수명이 매우 짧아서 지표면에서 관찰되지 않아야 하지만 실제로 뮤온은 지표면 근처에서 관측된다. 이를 특수 상대성 이론으로 설명할 수 있다.



시간 팽창이 일어나 뮤온의 수명이 길어지므로 지표면에 도달할 수 있다.



길이 수축이 일어나 지표면까지의 거리가 줄어들므로 지표면에 도달할 수 있다.

뮤온 뮤온의 속력은 빛의 속력 c에 가깝게 $0.99c$로 움직이지만 평균 수명이 2.2×10^{-6} s 정도이다. 따라서 뮤온이 대기권의 상층에서 생성되어 붕괴될 때까지 이동할 수 있는 거리를 고전 역학으로 계산하면 약 653 m 정도이다.

4. 특수 상대성 이론이 사회에 미친 영향

특수 상대성 이론은 시간과 공간을 절대적인 물리량이라고 생각했던 사람들의 생각을 바꾸면서 다양한 분야에 폭넓은 영향을 미쳤다.

길이의 표준	핵반응의 이용
국제 단위계에서는 길이 표준으로 m(미터)를 쓰는데, 1 m를 빛이 진공에서 $\frac{1}{299,792,458}$초 동안 진행한 거리로 정의한다.	특수 상대성 이론의 질량 에너지 동등성으로 핵반응 전후 *질량 결손에 의해 에너지가 방출되는 것을 설명하면서 전기 에너지의 생산에 태양의 수소 핵융합 반응, 우라늄의 핵분열 반응을 이용하게 되었다.
위성 위치 확인 시스템(GPS)의 이용	**문화와 예술**
위성 위치 확인 시스템(GPS)은 인공위성이 보내는 신호를 이용하여 위치 좌표를 계산한다. 이때 인공위성은 지구에 대해 빠르게 운동하고 있으므로 시간 팽창을 고려하여 시간을 보정하지 않으면 정확한 위치 정보를 계산할 수 없다.	• 초현실주의나 미래주의 화가들은 특정한 시점에서의 공간을 표현하는 방법에서 벗어나 시간과 공간을 결합해 하나의 그림에 표현하였다. • 시간과 공간에 대한 새로운 이해로 창의적인 예술 작품, 영화, 게임 등이 창작되었다.

질량 에너지 동등성 특수 상대성 이론의 또 다른 결과로 정지한 물체의 질량이 에너지가 될 수 있고, 운동하는 물체의 에너지가 질량이 될 수 있다는 것이다. 즉, 질량과 에너지는 별개의 양이 아니므로 서로 전환될 수 있으며, 에너지 E와 질량 m은 $E = mc^2$(c: 빛의 속력)의 관계가 있다.

질량 결손 태양 에너지는 수소 원자핵의 핵융합 반응에 의해 만들어지는데, 핵융합 과정에서 반응 전 입자들의 질량 합에 비해 반응 후 입자들의 질량 합이 감소한다. 이를 질량 결손이라고 한다.

개념 체크 I 빈칸을 채우고, ○ 또는 ×로 답하시오. (정답은 교재 말미 해설)

1. 뮤온이 지표면 근처에서 관측되는 현상을 지표면의 관찰자는 _____ 으로, 뮤온과 함께 움직이는 관찰자는 길이 수축으로 설명할 수 있다.
2. 질량 에너지 동등성에 따르면 에너지 E와 질량 m은 $E =$ _____ 의 관계가 있다.
3. 위성 위치 확인 시스템(GPS)은 인공위성의 시간 팽창을 고려하여 시간을 보정하지 않으면 정확한 위치 정보를 계산할 수 없다. ( )
4. 국제 단위계에서 1 m는 빛이 진공에서 1초 동안 진행한 거리로 정의한다. ( )

스스로 정리

- **관성 좌표계**는 관성 법칙이 성립하는 좌표계이고, **가속 좌표계**에서는 좌표계의 가속도 운동 때문에 가상의 힘인 **관성력**이 관찰된다.
- A에 대한 B의 **상대 속도**는 $v_{\mathrm{AB}} = v_{\mathrm{B}} - v_{\mathrm{A}}$이며, **갈릴레이의 상대성 원리**에 따르면 모든 관성 좌표계에서 운동 법칙은 동일하게 적용된다.
- **마이컬슨·몰리 실험**에서는 빛의 속력 차이를 관측할 수 없었고, 빛의 속력은 모든 관성 좌표계에서 같게 측정되어 빛에는 갈릴레이의 상대성 원리를 적용할 수 없었다.
- 특수 상대성 이론의 두 가설: **상대성 원리**(모든 관성 좌표계에서 물리 법칙은 동일하게 성립한다)와 **광속 불변 원리**(진공에서 빛의 속력은 모든 관성 좌표계에서 모든 방향에 대하여 c로 같다).
- **고유 시간**은 관성 좌표계의 같은 위치에서 일어난 두 사건 사이의 시간 간격이며, 다른 관성 좌표계에서 측정한 시간 간격은 항상 고유 시간보다 늘어난다(**시간 팽창**, $\Delta t = \gamma \Delta t_{\text{고유}}$).
- **고유 길이**는 한 관성 좌표계에 대해 고정된 두 지점 사이의 길이이며, 운동하는 관찰자가 측정한 길이는 운동 방향으로만 고유 길이보다 짧아진다(**길이 수축**, $L = L_{\text{고유}}\sqrt{1 - v^2/c^2}$).
- 상대 속력이 빛의 속력에 가까울수록 시간 팽창과 길이 수축 정도가 커진다. 뮤온이 지표면에 도달하는 현상은 시간 팽창 또는 길이 수축으로 설명된다.
- 특수 상대성 이론은 길이의 표준, 질량 에너지 동등성($E = mc^2$)을 이용한 핵반응, GPS의 시간 보정, 문화와 예술 등 다양한 분야에 영향을 미쳤다.

Part 2 · 기본 문제

9문항 · 정답과 해설은 Part 4.

개념 기본 문제

01 그림은 전조등을 켜고 지면에 대해 70 km/h의 일정한 속도로 달리는 트럭 위에서 투수가 공을 트럭에 대해 140 km/h의 속력으로 트럭의 운동 방향으로 던지는 것을 영희가 관찰하고 있는 것을 나타낸 것이다.

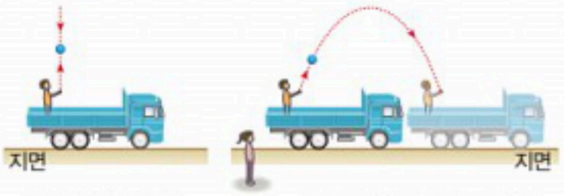


(1) 트럭 운전사가 관찰한 공의 속력을 쓰시오.

(2) 영희가 관찰한 공의 속력을 쓰시오.

(3) 트럭 운전사와 영희가 각각 관찰한 전조등 불빛의 속력을 비교하시오.

02 그림은 지면에 대해 일정한 속도로 움직이는 트럭 위에서 수직으로 공을 던졌다가 받는 것을 트럭 위의 관찰자와 지면에 정지해 있는 관찰자가 관측하는 것을 나타낸 것이다.



두 관찰자가 서로 같게 측정하는 것을 보기에서 있는 대로 고르시오. (단, 공기 저항은 무시한다.)

보기

ㄱ. 공의 속력
ㄴ. 공의 가속도
ㄷ. 공에 작용하는 알짜힘
ㄹ. 공의 운동을 설명하는 물리 법칙

03 다음은 아인슈타인의 특수 상대성 이론의 두 가지 가설에 대한 설명이다.

[가설 1] 상대성 원리: 모든 (㉠)에서 물리 법칙은 동일하게 성립한다.
[가설 2] (㉡) 원리: 진공 중에서 진행하는 빛의 속력은 모든 관성 좌표계에서 모든 방향에 대하여 c로 같다.

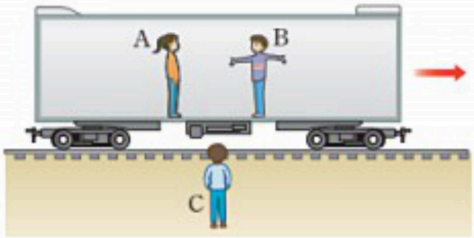
㉠, ㉡에 알맞은 말을 각각 쓰시오.

04 다음은 특수 상대성 이론에서 취급하는 두 가지 물리량에 대한 설명이다. 각각 어떤 물리량인지 쓰시오.

(1) 관성 좌표계의 동일한 위치에서 발생한 두 사건 사이의 시간 간격을 그 관성 좌표계에서 측정한 시간이다.

(2) 관성 좌표계에 고정된 두 점 사이의 거리를 그 관성 좌표계에서 측정한 길이이다.

05 그림은 광속에 가까운 일정한 속력으로 움직이는 기차에 타고 있는 A, B와 지면에 서 있는 C가 서로를 관찰하는 것을 나타낸 것이다.



제시한 내용이 옳은 사람만을 있는 대로 고르시오.

A: B의 시간은 나와 같은 빠르기로 흘러.
B: C의 시간은 A의 시간보다 빠르게 흘러.
C: A의 시간은 나보다 느리게 흘러.

06 그림과 같이 관찰자 A에 대해 관찰자 B가 탄 우주선이 $0.6c$의 일정한 속력으로 운동할 때, A가 측정한 우주선이 지구에서 별까지 가는 데 걸린 시간이 t_0이다.

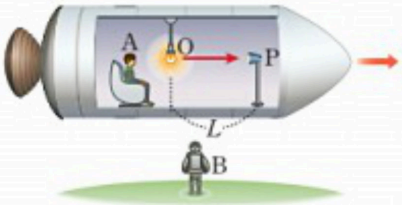


다음은 관찰자 A, B가 각각 관측한 내용이다.

- A의 관성 좌표계에서 측정한 지구와 별 사이의 거리는 (㉠)이다. 또한 A는 B의 시간이 자신의 시간보다 (㉡) 간다고 관측한다.
- B의 관성 좌표계에서 측정한 지구와 별 사이의 거리는 $0.6ct_0$보다 (㉢)고, 지구와 별이 우주선을 지나가는 데 걸린 시간은 t_0보다 (㉣)다.

㉠~㉣에 알맞은 말을 각각 쓰시오.

07 그림과 같이 관찰자 B에 대해 광속에 가까운 속력으로 등속도 운동을 하는 우주선 내부에 정지한 A가 측정할 때, 광원 O에서 방출된 빛이 검출기 P에 도달하는 데 걸린 시간은 t_0, O와 P 사이의 거리는 L이다.



B가 측정할 때에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고르시오.

보기

ㄱ. A의 시간은 자신의 시간보다 느리게 간다.
ㄴ. O와 P 사이의 거리는 L보다 작다.
ㄷ. O에서 방출된 빛이 P에 도달하는 데 걸린 시간은 t_0보다 작다.

08 그림과 같이 정지한 영희에 대해 광속에 가까운 일정한 속력으로 철수가 탄 우주선이 행성 A에서 행성 B를 향해 운동하고 있다. A, B는 영희에 대해 정지해 있다.

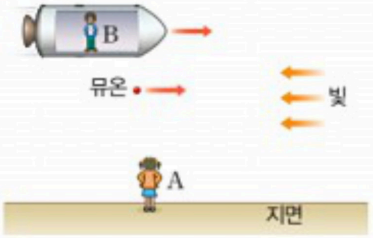


(1) 철수와 영희가 각각 측정한 A와 B 사이의 거리의 크기를 비교하시오.

(2) 철수와 영희가 각각 측정한 우주선이 A에서 B까지 운동하는 데 걸린 시간의 크기를 비교하시오.

(3) 위 두 가지 측정에서 고유 시간과 고유 길이는 각각 누가 측정한 것인지 쓰시오.

09 그림과 같이 지면에 정지한 관찰자 A에 대해 관찰자 B가 탄 우주선과 뮤온이 같은 속력으로 지면에 대해 나란하게 등속도 운동을 하고, 빛은 우주선과 반대 방향으로 지면과 나란하게 진행하고 있다.



B가 측정했을 때가 A가 측정했을 때보다 큰 물리량만을 보기에서 있는 대로 고르시오.

보기

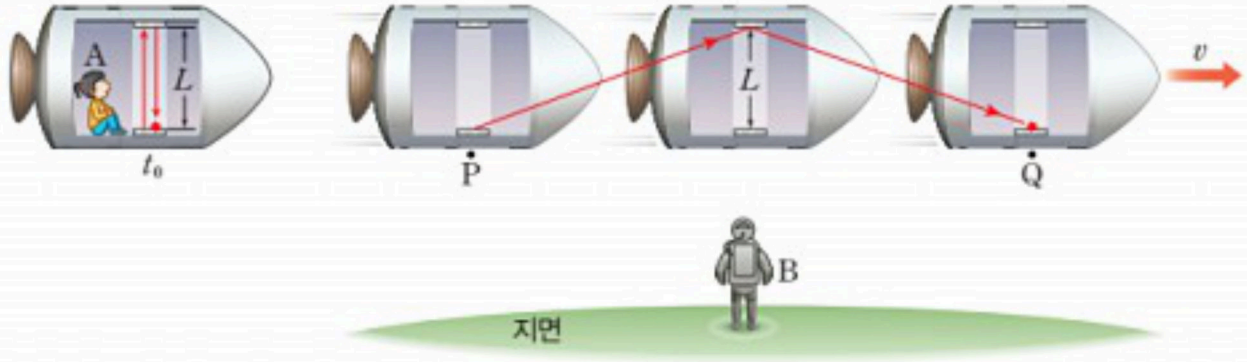
ㄱ. 빛의 속력
ㄴ. 뮤온의 속력
ㄷ. 뮤온의 수명
ㄹ. 우주선의 길이

Part 3 · 심화 문제

8문항 · 정답과 해설은 Part 4. 각 문항의 접근 Point는 해설에 수록.

개념 적용·도전 문제

01 그림은 지면에 정지한 관찰자 B에 대해 광속에 가까운 일정한 속력 v로 운동하는 우주선을 나타낸 것이다. 우주선에서 간격 L인 바닥과 천장 사이를 빛이 한 번 왕복하는 동안 걸린 시간은 우주선에 타고 있는 관찰자 A가 측정할 때 t_0이었다. B가 측정할 때 빛이 바닥에서 방출되는 순간과 바닥에 도달하는 순간 우주선의 위치는 각각 점 P와 점 Q이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

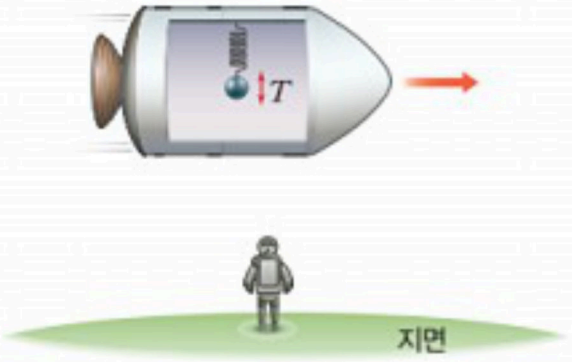
ㄱ. A와 B가 측정한 빛의 속력은 서로 같다.

ㄴ. B가 측정한 P에서 Q까지의 거리는 vt_0이다.

ㄷ. B가 측정할 때 A의 시간은 자신의 시간보다 느리게 간다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

02 그림은 지구에 대해 지면과 나란한 방향으로 일정한 속력으로 운동하는 우주선 내부에서 용수철에 매달린 물체가 진동하고 있는 것을 나타낸 것이다. 우주선 내부에서 측정한 물체의 진동 주기는 T이다.



지구 좌표계에서 측정할 때, 이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

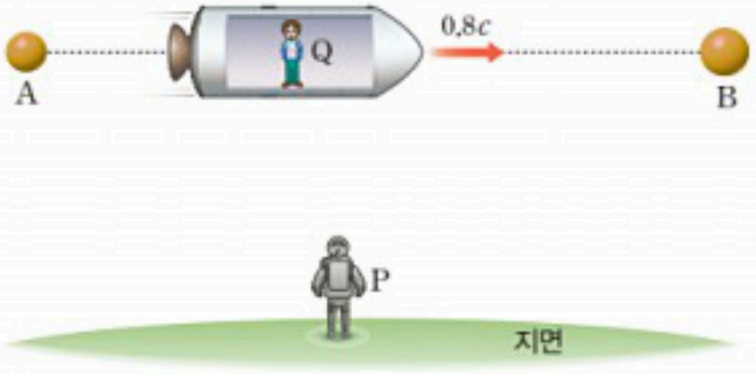
ㄱ. 우주선 안에서의 시간은 지구에서의 시간보다 느리게 간다.

ㄴ. 물체의 진동 주기는 T보다 길다.

ㄷ. 지구에 설치된 같은 용수철에 매달린 동일한 물체의 진동 주기는 T이다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

03 그림은 관찰자 P에 대해 관찰자 Q가 탄 우주선이 $0.8c$의 속력으로 행성 A에서 행성 B를 향해 등속도 운동을 하는 것을 나타낸 것이다. A, B는 P에 대해 정지해 있고 A, B를 잇는 직선은 우주선의 진행 방향과 나란하다. P가 측정할 때 우주선이 A에서 B까지 이동하는 데 걸린 시간은 t_0이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은? (단, c는 빛의 속력이다.)

보기

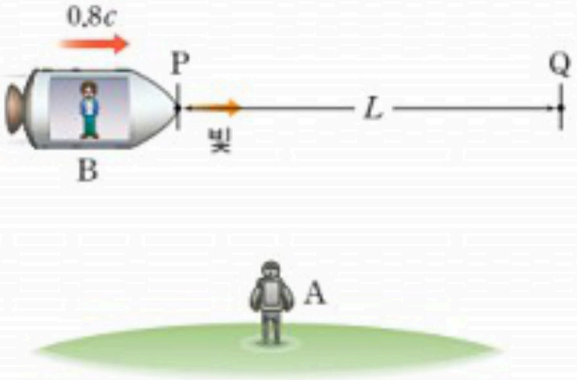
ㄱ. A와 B 사이의 고유 길이는 $0.8ct_0$보다 크다.

ㄴ. Q가 측정할 때, 자신의 시간은 P의 시간보다 느리게 간다.

ㄷ. Q가 측정할 때 우주선이 A에서 B까지 이동한 시간은 t_0보다 작다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

04 그림과 같이 관찰자 A에 대해 정지한 지점 P, Q와 P, Q를 잇는 직선과 나란한 방향으로 $0.8c$의 속력으로 등속도 운동을 하는 우주선에 관찰자 B가 타고 있다. A의 관성계에서 B가 P를 지나는 순간 우주선에서 빛을 방출하고, P와 Q 사이의 거리는 L이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은? (단, c는 빛의 속력이다.)

보기

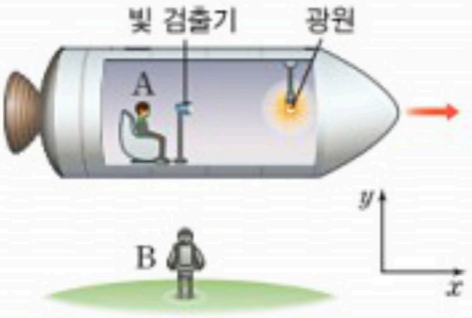
ㄱ. A가 측정할 때 우주선에서 방출된 빛의 속력은 $0.8c$이다.

ㄴ. B가 측정할 때 빛이 P에서 Q까지 이동하는 데 걸린 시간은 $\frac{L}{c}$보다 작다.

ㄷ. B가 측정할 때 우주선이 P에서 Q까지 이동하는 데 걸린 시간은 $\frac{L}{0.8c}$이다.

① ㄴ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

05 그림과 같이 정지해 있는 관찰자 B에 대하여 관찰자 A가 탄 우주선이 $+x$ 방향으로 광속에 가까운 속력으로 등속도 운동을 하고 있다. 표는 A와 B가 광원에서 나온 빛이 빛 검출기까지 도달하는 데 걸린 시간과 광원에서 빛 검출기까지의 거리를 각각 측정한 것을 나타낸 것이다.



관찰자	걸린 시간	거리
A	t_1	L_1
B	t_2	L_2

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

ㄱ. $L_1 > L_2$이다.

ㄴ. $t_1 > t_2$이다.

ㄷ. $\frac{L_1}{t_1} = \frac{L_2}{t_2}$이다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

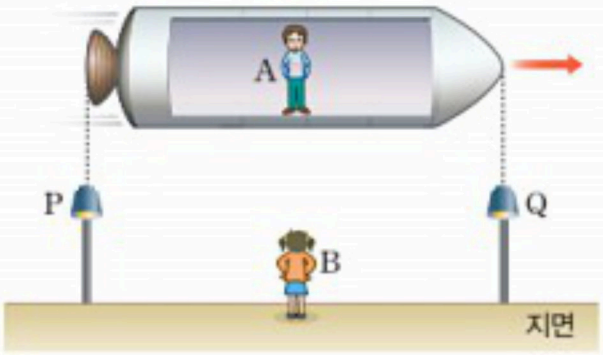
06 다음은 뮤온이 지표면 근처에서 발견되는 현상에 대한 설명이다.

뮤온은 수명이 매우 짧아서 지상에 도착하기 전에 붕괴되기 때문에 지표면에서 발견되지 않아야 하지만 실제로는 많은 뮤온이 지표면 근처에서 발견된다. 이것은 지표면에서 관측할 때, 광속의 99 % 정도로 빠르게 운동하는 뮤온의 시간이 (㉠) 가서 실제 수명보다 길어진다는 특수 상대성 이론과 일치하는 결과이다. 또한 뮤온의 관성계에서 관측할 때, 뮤온이 지나간 거리가 (㉡)으로 인해 (㉢) 때문에 뮤온의 수명 내에 충분히 도달하는 것으로 해석할 수도 있다.

㉠, ㉡, ㉢으로 가장 적절한 것은?

	㉠	㉡	㉢
①	빠르게	길이 팽창	길어지기
②	빠르게	길이 수축	짧아지기
③	느리게	길이 팽창	길어지기
④	느리게	길이 수축	짧아지기
⑤	빠르게	시간 팽창	길어지기

07 그림은 관찰자 A가 관찰할 때 자신이 타고 있는 우주선의 앞이 가로등 Q를 지나는 순간 우주선의 뒤가 가로등 P를 지나는 것을 나타낸 것이다. A가 탄 우주선은 P, Q를 잇는 직선에 나란하게 광속에 가까운 속력으로 등속도 운동을 하고, 관찰자 B, P, Q는 지면에 대해 정지해 있다.



B의 관성계에서 측정할 때, 이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

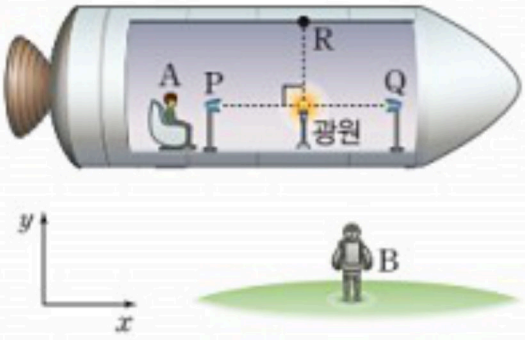
ㄱ. 우주선의 길이는 P와 Q 사이의 길이와 같다.

ㄴ. 우주선 전체가 P를 지나는 데 걸린 시간은 A의 측정값보다 길다.

ㄷ. 우주선의 뒤가 P를 먼저 지나고 우주선의 앞이 Q를 나중에 지난다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄷ ④ ㄱ, ㄴ ⑤ ㄴ, ㄷ

08 그림과 같이 관찰자 A가 탄 우주선이 x축과 나란한 방향으로 관찰자 B에 대해 광속에 가까운 속력으로 등속도 운동을 한다. 광원에서 방출한 빛은 A의 관성계에서는 검출기 P보다 검출기 Q에 먼저 도달하고 B의 관성계에서는 Q보다 P에 먼저 도달한다. A의 관성계에서 광원에서 발생한 빛이 우주선 내부의 한 점 R까지 진행하는 데 걸린 시간은 t_0이다. P, 광원, Q를 잇는 직선은 x축과 나란하다.



B의 관성계에서 측정할 때, 이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

ㄱ. P와 Q 사이의 거리는 P와 Q 사이의 고유 길이보다 작다.

ㄴ. 빛이 광원에서 R까지 가는 데 걸린 시간은 t_0보다 크다.

ㄷ. 우주선의 운동 방향은 $-x$ 방향이다.

① ㄴ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄱ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

Part 4 · 정답과 해설

1 개념 체크 정답

A	1. 관성 좌표계	2. 관성력	3. ×	4. ○
B	1. $v_{\mathrm{B}} - v_{\mathrm{A}}$	2. 운동 법칙	3. ○	4. ×
C	1. 에테르	2. 매질	3. ×	4. ○
D	1. 물리 법칙	2. 4	3. ×	4. ○
E	1. 광속 불변	2. c	3. ○	4. ×
F	1. 사건	2. 고유 시간	3. ○	4. ×
G	1. 천천히	2. 로런츠 인자	3. ×	4. ○
H	1. 고유 길이	2. 운동	3. ×	4. ○
I	1. 시간 팽창	2. mc^2	3. ○	4. ×

2 기본 문제 해설

개념 기본 문제

정답

01	(1) 140 km/h (2) 210 km/h (3) 같다.	02	ㄴ, ㄷ, ㄹ
03	㉠ 관성 좌표계(관성계) ㉡ 광속 불변	04	(1) 고유 시간 (2) 고유 길이
05	A, C	06	㉠ $0.6ct_0$ ㉡ 느리게 ㉢ 작(짧) ㉣ 작(짧)
07	ㄱ, ㄴ	08	(1) 영희가 측정할 때가 더 크다. (2) 영희가 측정할 때가 더 크다. (3) 고유 시간: 철수, 고유 길이: 영희
09	ㄹ		

01 (1) 트럭 운전사는 트럭을 타고 있는 투수와 같은 좌표계에 있으므로 공의 속력을 투수와 똑같이 140 km/h로 측정한다.
(2) 영희가 측정할 때 속력이 70 km/h인 트럭에서 공을 140 km/h로 던지는 것이므로 공의 속력은 70 km/h + 140 km/h = 210 km/h이다.
(3) 광속 불변 원리에 따라 트럭 운전사와 영희가 관찰한 빛의 속력은 같다.

02 ㄴ, ㄷ. 공에 작용하는 힘은 중력뿐이므로 알짜힘은 중력, 가속도는 중력 가속도로 서로 같다.
ㄹ. 관성 좌표계에서 알짜힘과 가속도가 같으므로 공의 운동을 설명하는 물리 법칙은 서로 같다.
바로알기 ㄱ. 지면의 관찰자는 공의 속력을 측정할 때 운동하는 트럭의 속력을 더하므로 두 관찰자가 측정한 공의 속력은 다르다.

03 특수 상대성 이론에서는 상대성 원리에 따라 모든 관성 좌표계에서 물리 법칙은 동일하게 성립하고, 광속 불변 원리에 따라 진공에서의 빛의 속력은 관찰자의 운동 상태와 관계없이 c로 항상 일정하다고 가정한다.

04 (1) 한 관성 좌표계에서 동일한 위치에서 발생한 두 사건 사이의 시간 간격을 고유 시간이라고 한다.
(2) 한 관성 좌표계에 대해 위치가 변하지 않고 고정된 두 점 사이의 거리를 고유 길이라고 한다.

05 A: A와 B는 같은 관성 좌표계에 있으므로 두 사람이 측정한 시간 간격은 같다.
C: C가 관찰할 때 A는 일정한 속력으로 운동한다. 시간 팽창에 의해 자신에 대해 운동하는 관찰자의 시간은 자신보다 느리게 흐르므로 C가 볼 때 A의 시간이 자신의 시간보다 느리게 흐른다.
바로알기 B: B가 볼 때 자신과 A는 정지해 있고 C가 일정한 속력으로 움직이므로 C의 시간이 자신의 시간보다 느리게 흐른다.

06 • A가 측정할 때 우주선이 $0.6c$의 속력으로 시간 t_0 동안 운동한 거리가 지구에서 별까지의 거리이므로 $0.6ct_0$이다. A에 대해 지구와 별은 정지해 있으므로 A가 측정한 지구에서 별까지의 거리는 고유 길이이다. 또한 A에 대해 B가 일정한 속력으로 운동하므로 A가 볼 때 B의 시간은 자신의 시간보다 느리게 흐른다.
• B가 측정할 때 자신은 정지해 있고 지구와 별이 운동하므로 길이 수축이 일어나 지구에서 별까지의 거리는 A가 측정한 거리(고유 길이) $0.6ct_0$보다 작다. 속력은 $0.6c$로 같은데 지구에서 별까지의 거리가 짧아지므로 지구와 별이 우주선을 지나가는 데 걸린 시간도 t_0보다 작다.

07 A는 O와 P에 대해 정지해 있으므로 A가 측정한 O와 P 사이의 거리 L은 고유 길이이다.
ㄱ. B가 측정할 때, 우주선이 일정한 속력으로 운동하므로 A의 시간이 자신의 시간보다 느리게 흐른다.
ㄴ. B가 측정할 때, 우주선이 일정한 속력으로 운동하므로 길이 수축이 일어나 O와 P 사이의 거리는 고유 길이인 L보다 작다.
바로알기 ㄷ. O에서 방출된 빛이 P로 진행하는 동안 우주선이 운동하므로 처음 빛이 방출된 위치에서 P가 점점 멀어지므로 빛이 더 먼 거리를 이동해야 P에 도달할 수 있다. 빛의 속력은 일정한데, P에 도달할 때까지 빛이 진행하는 거리는 B가 측정할 때가 A가 측정할 때보다 크다. 따라서 B가 측정한 빛이 P에 도달하는 데 걸린 시간은 A가 측정한 t_0보다 크다.

08 (1) 영희는 A와 B에 대해 정지해 있으므로 A와 B 사이의 고유 길이를 측정한다. 반면, 철수에 대해 A와 B가 움직이므로 철수가 측정한 A와 B 사이의 거리는 길이 수축에 의해 고유 길이보다 짧다.

(2) 영희가 측정할 때 A와 B 사이의 거리는 철수가 측정한 것보다 크고, 철수의 관성계에서 A, B가 운동하는 속력과 영희의 관성계에서 우주선이 운동하는 속력이 같으므로 우주선이 A에서 B까지 운동하는 데 걸린 시간은 영희가 측정할 때가 더 크다.

(3) 영희가 볼 때 A, B의 위치가 고정되어 있으므로 영희가 측정한 A, B 사이의 거리가 고유 길이이다. 한편 철수가 볼 때 A, B가 우주선과 만나는 사건이 같은 위치에서 일어나므로 철수가 측정한 시간이 고유 시간이다.

09 ㄹ. B의 관성계에서 우주선이 정지해 있으므로 B가 측정한 우주선의 길이가 고유 길이이다. A의 관성계에서 우주선이 운동하고 있으므로 우주선의 길이는 길이 수축이 일어나 고유 길이보다 짧다.

바로알기 ㄱ. 빛의 속력은 모든 관성계에서 같다.

ㄴ. B와 뮤온은 같은 속력으로 운동하므로 B는 뮤온이 정지해 있는 것으로 관측한다.

ㄷ. B의 관성계에서는 뮤온이 정지해 있으므로 B가 측정한 뮤온의 수명은 고유 시간이고, A의 관성계에서는 뮤온이 운동하므로 시간 팽창에 의해 뮤온의 수명이 고유 시간보다 길게 측정된다.

3 심화 문제 해설

개념 적용·도전 문제

정답

01	③	02	⑤	03	②	04	①	05	③	06	④	07	③	08	③

개념 적용·도전 문제 01번

접근 Point 광속 불변 원리에 따라 빛의 속력은 모든 관성 좌표계에서 모든 방향에 대하여 c로 같다.

01 ㄱ. 빛의 속력은 모든 관성 좌표계에서 일정하므로 A, B가 측정한 빛의 속력은 서로 같다.

ㄷ. 빛의 속력은 일정하므로 빛이 진행한 거리를 비교하여 걸린 시간을 비교할 수 있다. 빛이 이동한 거리는 B가 측정할 때가 A가 측정할 때보다 크므로, 빛이 한 번 왕복하는 데 걸린 시간은 B가 측정한 시간이 A가 측정한 시간보다 크다. 따라서 B는 A의 시간이 자신의 시간보다 느리게 간다고 관측한다.

바로알기 ㄴ. B가 측정할 때 빛이 한 번 왕복하는 시간이 t_0보다 길다. B가 측정할 때 우주선이 P에서 Q까지 이동하는 동안 v의 속력으로 t_0보다 긴 시간을 이동하므로 P와 Q 사이의 거리는 vt_0보다 크다.

개념 적용·도전 문제 02번

접근 Point 우주선 내부에 매달린 물체는 우주선과 같은 좌표계에 있으며, 이 물체가 지구 좌표계로 이동하면 물체는 지구 좌표계와 같은 좌표계에 있게 된다.

02 ㄱ. 지구에 대해 우주선이 운동하고 있으므로 시간 팽창이 일어나 지구에서 볼 때 우주선 안에서의 시간이 지구에서의 시간보다 느리게 간다.

ㄴ. 우주선 안에서 측정할 때, 물체는 우주선과 같은 좌표계에 있으므로 물체의 진동 주기 T는 고유 시간이다. 지구에서 측정할 때 우주선 안에서의 시간이 느리게 가므로 물체의 운동 주기는 T보다 길다.

ㄷ. 지구에 용수철을 설치하면 지구 지면에 설치한 용수철은 지구와 같은 좌표계에 있다. 따라서 물체의 진동 주기는 고유 시간인 T로 같다.

개념 적용·도전 문제 03번

접근 Point 관찰자에 대해 운동하고 있는 사람의 시간은 시간 팽창이 일어나고, 관찰자에 대해 운동하고 있는 물체의 길이는 길이 수축이 일어난다.

03 P에 대해 A, B가 정지해 있고 우주선이 $0.8c$의 속력으로 시간 t_0 동안 A에서 B로 이동하므로 A와 B 사이의 거리는 $0.8ct_0$이다.

ㄷ. Q가 측정할 때, Q에 대해 A, B가 $0.8c$의 속력으로 이동하므로 길이 수축에 의해 A와 B 사이의 거리는 Q가 측정할 때가 P가 측정한 거리 $0.8ct_0$보다 작다. 따라서 Q가 측정할 때 우주선이 A에서 B까지 이동하는 데 걸린 시간은 t_0보다 작다.

바로알기 ㄱ. 고유 길이는 관성 좌표계에 고정된 두 점 사이의 거리이다. A, B는 P에 대해 정지해 있으므로 P가 측정한 A와 B 사이의 길이는 고유 길이로 $0.8ct_0$이다.

ㄴ. Q가 측정할 때, 자신은 정지해 있고 P, A, B가 운동하므로 시간 팽창이 일어나 P의 시간이 자신의 시간보다 느리게 가는 것으로 관측한다.

개념 적용·도전 문제 04번

접근 Point 관찰자에 대해 움직이는 물체의 길이를 측정하면 길이 수축이 일어나 고유 길이보다 짧다.

04 ㄴ. A에 대해 P, Q가 정지해 있으므로 A가 측정한 P와 Q 사이의 거리 L은 고유 길이이다. B에 대해 P, Q가 $0.8c$의 속력으로 이동하므로 길이 수축에 의해 B가 측정한 P와 Q 사이의 거리는 고유 길이 L보다 작다. 빛의 속력은 일정하므로 B가 측정한 빛이 P에서 Q까지 이동하는 데 걸린 시간은 $\frac{L}{c}$보다 작다.

바로알기 ㄱ. 광속 불변의 원리에 따라 빛의 속력은 모든 관성계에서 c로 같다.

ㄷ. B가 측정한 P와 Q 사이의 거리는 고유 길이 L보다 작다. 따라서 B가 측정한 우주선이 P에서 Q까지 이동하는 데 걸린 시간은 $\frac{L}{0.8c}$보다 작다.

개념 적용·도전 문제 05번

접근 Point 빛의 속력은 빛이 진행하는 거리를 걸린 시간으로 나누어 구한다.

05 ㄱ. A에 대하여 광원, 빛 검출기가 정지해 있으므로 L_1은 광원과 빛 검출기 사이의 고유 길이이다. 한편 B에 대하여 A가 탄 우주선이 $+x$ 방향으로 운동하므로 B가 측정한 거리 L_2는 길이 수축이 일어나 L_1보다 짧다.

ㄴ. B의 관성계에서 빛 검출기는 광원에서 방출된 빛을 향해 이동하므로 A의 관성계에서보다 더 짧은 거리를 이동하여 검출기에 도달한다. 이때 빛의 속력은 일정하므로 빛의 이동 시간은 빛의 진행 거리에 비례한다. 따라서 $t_1 > t_2$이다.

바로알기 ㄷ. A의 관성계에서 빛의 속력은 $\frac{L_1}{t_1}$이다. B의 관성계에서 빛 검출기가 광원 쪽으로 이동하므로 빛이 t_2 동안 L_2보다 짧은 거리를 이동한다. 따라서 $\frac{L_2}{t_2}$는 빛의 속력보다 크고 $\frac{L_2}{t_2} > \frac{L_1}{t_1}$이다.

개념 적용·도전 문제 06번

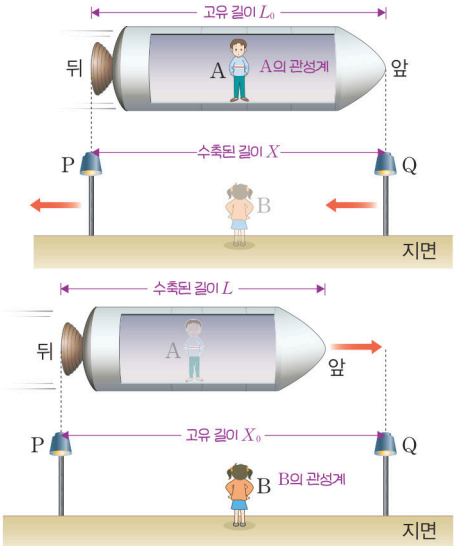
접근 Point 지표면의 관찰자 입장에서는 뮤온이 운동하고, 뮤온의 입장에서는 자신은 정지해 있고, 지표면이 자신을 향해 운동한다.

06 지표면에서 볼 때 뮤온이 운동하므로 뮤온의 시간이 느리게(㉠) 간다. 뮤온의 관성계에서는 지구가 운동하므로 뮤온이 지나간 거리가 길이 수축(㉡)에 의해 짧아진다.(㉢)

개념 적용·도전 문제 07번

접근 Point 관성 좌표계의 같은 장소에서 일어난 두 사건의 시간 간격이 고유 시간이고, 물체에 대하여 정지한 좌표계에서 측정한 길이가 고유 길이이다.

07 A의 관성계에서 P, Q가 A에 대해 운동하고 있으므로 A가 측정한 P와 Q 사이의 거리는 길이 수축에 의해 고유 길이보다 짧아진 길이이다. 또한 우주선은 A와 같은 관성계에 있으므로 A가 측정한 우주선의 길이는 고유 길이이다. A가 측정한 우주선의 고유 길이를 L_0, 수축된 P와 Q 사이의 거리를 X라고 하면 우주선의 앞이 Q를 지나는 순간, 우주선의 뒤가 P를 지나므로 $L_0 = X$이다.



ㄷ. B의 관성계에서 P, Q는 B에 대해 정지해 있으므로 B가 측정한 P와 Q 사이의 거리는 고유 길이이다. 이를 X_0이라고 하자. 한편 우주선은 B에 대해 운동하고 있으므로 B가 측정한 우주선의 길이는 길이 수축에 의해 짧아진 길이이다. 이를 L이라고 하자. 고유 길이는 항상 수축된 길이보다 크므로 $L_0 > L$, $X_0 > X$이므로 $X_0 > X = L_0 > L$의 관계가 성립한다. P와 Q 사이의 거리가 우주선의 길이보다 크므로 우주선이 P에서 Q로 진행할 때 우주선의 뒤가 P를 지난 후 우주선의 앞이 Q를 지난다.

바로알기 ㄱ. $X_0 > L$이므로 B의 관성계에서 우주선의 길이는 P와 Q 사이의 거리보다 작다.

ㄴ. 우주선 전체가 P를 지나는 데 걸린 시간은 우주선의 길이를 속력으로 나눈 값이다. $L_0 > L$이고 A와 B의 관성계에서 움직이는 상대방의 상대 속력은 서로 같으므로 B의 관성계에서 우주선 전체가 P를 지나는 데 걸린 시간은 A의 측정값보다 짧다.

개념 적용·도전 문제 08번

접근 Point 광속 불변 원리에 따라 관찰자의 운동 상태에 관계없이 빛의 속력은 항상 일정하다. 따라서 빛의 도달 시간을 비교하면 두 지점 사이의 거리를 비교할 수 있다.

08 ㄱ. B에 대해 우주선이 운동하고 있으므로 B가 측정한 P와 Q 사이의 거리는 길이 수축에 의해 고유 길이보다 짧게 측정된다.

ㄴ. A에 대해 광원과 우주선이 정지해 있으므로 A의 관성계에서 빛이 광원에서 R까지 이동하는 경로는 수직(↑) 경로이다. B에 대해 우주선이 운동하고 있으므로 B가 관찰할 때 광원에서 방출된 빛이 R로 이동하는 동안 우주선이 x축과 나란한 방향으로 운동하여 R의 위치도 이동한다. 따라서 B가 관찰할 때 빛이 광원에서 R까지 이동하는 경로는 대각선(↗) 경로로 A가 측정할 때보다 길다. 이때 A, B가 측정하는 빛의 속력은 같으므로 이동 경로가 길어지면 빛이 진행하는 데 걸린 시간은 t_0보다 크다.

바로알기 ㄷ. 빛의 속력이 일정하므로 빛이 진행하는 데 걸린 시간이 짧을수록 빛이 이동한 거리가 짧다. 따라서 A의 관성계에서 광원에서 방출한 빛이 P보다 Q에 먼저 도달하므로 광원에서 P까지의 거리는 Q까지의 거리보다 크다. B의 관성계에서는 광원에서 방출한 빛이 Q보다 P에 먼저 도달하므로 빛이 P까지 이동한 거리가 Q까지 이동한 거리보다 작다. 따라서 P는 광원에서 방출된 빛에 가까워지는 방향으로 이동해야 하므로 우주선은 $+x$ 방향으로 운동한다.