

지금부터는 본격적으로 특수 상대성 이론에 대해 알아보도록 하겠습니다.

심화라고는 해도 미리 상대성 이론을 복습하고 와야 하는 것은 아닙니다.

근본적인 부분부터 설명할 예정이에요.

오히려 기존에 배웠던 내용을 “모두 잊어버리고” 이 특강을 읽어주시기를 바랍니다.

어려운 예제들도 들어있으니, 풀이가 이해가 안 되시면 앞부분부터 다시 읽어보시고

그래도 잘 모르시겠다면 질문바랍니다.

지금까지 좌표계에서 물체들, 또는 다른 좌표계들의 위치, 속도, 가속도를 관측했습니다.

그런데 우리가 관측할 대상이 하나 더 있습니다.

바로 물리적 현상의 발생, **사건**입니다.

사건은 크게 어려운 개념은 아니지만 특수 상대성 이론에서 가장 핵심적인 개념입니다.

왜 그런지는 이후에 알아보고, 지금은 사건이 무엇인지를 알아보도록 하죠.

사건은 앞서 적었듯 물리적 현상의 발생을 의미합니다.

물리적 현상에는 다양한 것들이 있을 수 있습니다.

가만히 잡고 있던 물체를 놓는 것, 자동차가 정지하는 것, 총을 발사하는 것 등도 있을 것이고

광원의 예를 들면 광원에서 빛을 발하는 것, 광원이 꺼지는 것 등등이 있을 수 있겠죠.

시계가 0시를 가리키는 것, 철수가 기준선을 지나는 것도 물리적 현상이라고 할 수 있습니다.

물리에서는 그러한 사건들을 '사건이 일어난 위치'와 '사건이 일어난 시각'으로 나타냅니다.

즉, 사건은 사건이 발생한 시공간 상의 한 점에 대응시켜 나타냅니다.

예를 들어 1차원 공간에 살고 있는 철수가 자기가 있는 지점을 공간상의 원점으로 정하고

어느 순간 시계를 0초로 맞추었다고 합시다. (시계를 0초로 = 시간상의 원점으로)

이렇게 설정된 철수의 좌표계에서 철수가 민수의 운동을 관측한 결과가 다음과 같다고 합니다.

1초일 때 : 2m 지점 출발    2초일 때 : -2m 지점 지남    3초일 때 : -3m 지점 지남

이걸 사건으로 해석하여 적으면 다음과 같습니다.

(민수가 +2m 지점에서 출발하는 사건) = (2, 1)

※ 사건 = (위치, 시간)

(민수가 -2m 지점을 지나는 사건) = (-2, 2)

(민수가 -3m 지점을 지나는 사건) = (-3, 3)

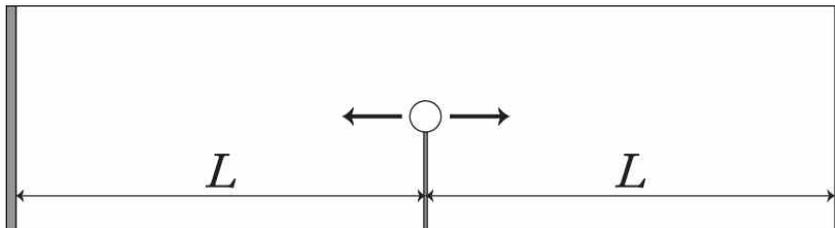
※ 운동 방향은 변하지 않는다고 가정합니다.

이처럼 물체의 운동을 사건들의 연속으로 나타낼 수 있습니다.

하지만 상대성 이론 문제에서는 다른 사건들이 주로 나타나는데, 예제로 살펴봅시다.

**예제 19)** 길이가 2인 방의 가운데에 광원을 설치하였다. 0초일 때 광원에서 두 벽을 향해 빛을 쏘았을 때, 광원에 대해 정지한 관찰자가 관측한 왼쪽 벽에 빛이 도달하는 사건 A와 오른쪽 벽에 빛이 도달하는 사건 B를 순서쌍으로 나타내면?

(단, 오른쪽이 양(+)의 방향이고 광원의 위치가 원점이다.)



※ 별 다른 언급이 없으면 앞으로  $c$ 는 광속이며 공간은 진공인 것으로 약속하자.

사건을 순서쌍으로 나타내는 것이 고등학교 시험에 직접적으로 나오는 것은 아닙니다만,

사건의 설정에 대한 이해를 위해서는 꼭 필요한 부분이니까 함께 계산해봅시다.

1> A는 왼쪽 벽의 위치( $-L$ )에서 일어나며, 빛의 속력이  $c$ 이고 이동거리가  $L$ 이므로

시각  $\frac{L}{c}$ 에 일어납니다. 따라서 A는  $(-L, \frac{L}{c})$ 입니다.

2> B는 오른쪽 벽의 위치( )에서 일어나며, 빛의 속력이  $c$ 이고 이동거리가  $L$ 이므로

A와 마찬가지로 시각  $\frac{L}{c}$  에 일어납니다. 따라서 B는  $(L, \frac{L}{c})$ 입니다. (+는 생략)

※ 위치, 시간, 속도 계산은 앞의 네 특강에서 살펴본 내용이니 이후에도 간단히 넘어갈 예정입니다.

이때, A와 B가 일어난 시각이  $\frac{L}{c}$ 로 같으므로 광원에 대해 정지한 관찰자는

두 사건이 동시에 일어난 것으로 관측합니다. 식으로 나타내면 아래와 같습니다.

$$t - t_A = \frac{L}{c} - \frac{L}{c} = 0$$

이 외에도 문제를 풀다보면 많은 사건들이 등장하는데, 대부분 비슷비슷합니다.

**ex)** 빛이 대상(기준선, 철수...)에 도달하는 사건, 광원(화산, 전구, 우주선...)에서 빛을 쏘는 사건  
대상(뮤온, 우주선, 철수...)이 어떤 위치(기준선, 행성, 명시되지 않은 지점...)에서 출발하는 사건  
뮤온이 붕괴하는 사건, 대상(우주선, 기차, 철수...)이 다른 위치(기준선, 행성...)에 도달하는 사건  
두 빛이 어떤 지점에서 교차하는 사건, 두 사람의 시계가 한 지점에서 일치하는 사건 등.

여러분이 가지고 있는 교재에 나오는 상대성이론 문제에서 더 많은 사건을 찾을 수 있습니다.

쉬운 예제를 하나 더 들어보도록 하겠습니다.

**예제 20)** 산에 정지해 있는 철수가 관측할 때, 뮤온이 산의 꼭대기와 같은 해발  
고도에서 출발하여 연직 아래로  $0.8c$ 의 속력으로 시간  $t$  동안 운동하여 붕괴하  
였다. 이 상황에서 적당히 좌표축과 사건을 설정하여 순서쌍으로 나타내면?

여기서 말하는 가장 적당한 (철수가 관측한) 사건은 뮤온이 붕괴하는 사건입니다.

(철.관) 뮤온이 붕괴하는 사건은 바로 (철.관) '뮤온의 수명'과 관련이 있기 때문입니다.

연직 아래를 (+) 방향, (철.관) 뮤온의 처음 위치/출발 시각을 시공간 상의 원점으로 두면

(철.관) 뮤온이 붕괴하는 사건은  $(0.8ct, t)$ 입니다. 철수의 관측이라는 것에 유의하세요.

자, 이제 사건이 무엇인지 알았으니 본격적으로 특수상대성이론을 공부해봅시다.

특수상대성이론은 사실 딱 두 가지 기본 원리로 구성되어 있습니다.

실제 문제에 등장하는 나머지 현상들은 모두 여기서 유도된 결론에 해당합니다.

첫 번째는 **상대성 원리**입니다.

상대성 원리란 '모든 관성 좌표계에서 관측한 물리법칙은 동일하다'는 것입니다.

겉보기엔 당연해보이고 별로 중요해보이지 않는 명제입니다만, 숨은 의미가 있습니다.

이것은 그 어떤 좌표계도 '절대적인 기준'이 될 수 없다는 것을 의미합니다.

즉, 주어진 상황에서 모든 관성 좌표계는 '동등'합니다. 절대 우위관계가 있지 않습니다.

앞의 칼럼에서 좌표계에 대해 공부했던 것이 기억나십니까?

좌표계의 관찰자는 모두 자신이 정지해 있다고 관측합니다. 자신이 기준이 되는 것이죠.

그리고 실제로 각 관찰자에게는 세상의 기준이 자기 자신인 것이 옳습니다.

아직 관성 좌표계에 대해서 설명하지는 않았지만 상대성 원리에 대해 예시 하나만 들어보고

자세히 설명하도록 하겠습니다. 일단은 등속도 운동하는 좌표계라고 합시다.

**예제 21)** 아무 것도 보이지 않는 우주공간에서 우주복만 입고 유명하고 있는 갑과 작동이 정지된 우주 정거장에 서있는 을이 만났다. 갑은 을은 서로 상대가 등속 직선 운동하여 다가와 자신을 스쳐 지나갔고 주장했다. 실제로는 어떨까?

실제 같은 건 없습니다. 갑에게는 을과 우주 정거장이 등속 직선 운동하는 것이 사실이고

을에게는 우주복을 입은 갑이 등속 직선 운동하는 것이 사실입니다.

우리는 갑의 기준(좌표계)으로 관측할 수도 있고, 을의 기준(좌표계)으로 관측할 수도 있습니다.

두 좌표계 다 동등하기 때문에 둘 중 어느 것도 나은 것도, 틀린 것도 없습니다.

진짜 중요한 것은 바로 "**갑이 관측한 상황**"과 "**을이 관측한 상황**"을

모두 자유자재로 머릿속에 그릴 수 있어야 한다는 것입니다.

**관성계**(관성 좌표계)와 **가속계**(비관성 좌표계)에 대해 좀 더 정확히 알아보시다.

보통 관성계는 정지해 있거나 등속도 운동하는 좌표계라고 이야기합니다.

가속계는 가속도 운동을 하는 좌표계라고 말하고요.

그런데 이 칼럼을 꾸준히 읽은 학생이라면 여기서 의문점을 가져야 합니다.

“**모든 운동은 상대적**”인데, 정지해 있거나 등속도 운동하는 좌표계라는 말은 좀 애매합니다.

마찬가지로 가속도 운동하는 좌표계라는 말도 애매하죠.

그러므로 관성계와 가속계를 새로 정의하도록 하겠습니다.

관성계는 뉴턴의 제 1법칙, 관성의 법칙이 성립하는 좌표계입니다.

관성계에서는 알짜힘이 0인 물체가 정지해 있거나 등속도 운동하는 것으로 관측됩니다.

언뜻 보면 당연하지만 사실 그렇지 않습니다. 가속계에서는 아니거든요.

관성계를 이렇게 정의하면 기존에 관성계라고 부르던 것들이 모두 잘 포함됩니다.

관성계는 특수상대성이론의 무대가 되는 좌표계입니다.

특수상대성이론의 기본 원리인 상대성 원리가 관성계끼리 성립하는 것이기 때문이죠.

앞으로 특수상대성이론을 설명할 때 계속해서 관성계에서 다룰 텐데

혹시 그냥 좌표계라고 적혀있다면 모두 관성계라고 가정하고 읽어주시면 됩니다.

한편 가속계는 뉴턴 법칙이 성립하도록 하기 위해 **관성력**이 도입되는 좌표계입니다.

그래서 가속계에서는 세상 모든 물체에 작용하는 힘인 관성력이라는 것이 관측됩니다.

가속계는 일반상대성이론의 무대가 되는 좌표계이고 관성력은 가속계의 성질이기 때문에

지금 설명할 필요는 없을 것 같으니 넘어가도록 합시다.

특수상대성이론의 두 번째 원리는 **광속 불변의 원리**입니다.

광속 불변의 원리는 '진공에서의 빛의 속도는 모든 관성계에서 일정하다'는 것입니다.

첫 번째 원리와 마찬가지로 여기에도 중요한 숨은 의미가 있습니다.

일반적으로 물체는 여러 속도를 가집니다. 공 같은 것을 생각합시다.

일단 공이 관찰자에 대해 정지해 있을 수 있습니다.

공 자체에 추진기가 달려서 움직일 수도 있고, 누군가 던져줄 수도 있죠.

혹은 관찰자가 지면에 가만히 놓인 공을 향해 달려가면서 측정할 수도 있습니다.

이처럼 공과 관찰자가 어떤 상태에 있느냐에 따라 공의 속도는 달라집니다.

※ 물론 이 속도는 (그리고 모든 속도는) 상대속도입니다.

구체적인 예시를 들어보죠. 철수와 영희가 지면에 서서 공놀이를 하고 있습니다.

우리는 지면에서 관측을 하고 있고 공기 저항이나 중력은 없다고 가정합시다.

**<철수와 영희가 모두 지면에 대해 정지해 있는 경우>**

철수가  $m/s$ 의 속력으로 영희에게 공을 던집니다.

그러면 영희가 관측할 때, 공은  $5m/s$ 의 속력으로 다가올 것입니다.

**<철수가  $10m/s$ 의 속력으로 영희에게 다가가는 경우>**

철수가  $5m/s$ 의 속력으로 영희에게 공을 던집니다.

그러면 영희가 관측할 때, 공은  $15m/s$ 의 속력으로 다가올 것입니다.

**<철수가  $10m/s$ 의 속력으로 영희에게서 멀어지는 경우>**

철수가  $5m/s$ 의 속력으로 영희에게 공을 던집니다.

그러면 영희가 관측할 때, 공은  $5m/s$ 의 속력으로 점점 멀어질 것입니다.

이처럼 공의 속도는 관찰자에 따라 다르게 측정됩니다.

한편, 광속 불변의 원리에 따르면 빛은 이런 구시대적 상대속도 계산을 무시합니다.

※ 실제로는 상대론적 상대속도는 계산 방법이 따로 있습니다. 후에 살펴보도록 하겠습니다.

철수와 영희가 지면에 서서 레이저 놀이를 하고 있습니다.

우리는 지면에서 관측을 하고 있고 공기 저항이나 중력은 없다고 가정합니다.

#### <철수와 영희가 모두 지면에 대해 정지해 있는 경우>

철수가 영희에게 레이저를 쏩니다. 철수가 관측할 때, 빛의 속력은  $c$ 겠죠.

그러면 영희가 관측할 때, 레이저는  $c$ 의 속력으로 다가올 것입니다.

#### <철수가 $0.5c$ 의 속력으로 영희에게 다가가는 경우>

철수가 영희에게 레이저를 쏩니다. 철수가 관측할 때, 빛의 속력은  $c$ 겠죠.

그러면 영희가 관측할 때, 레이저는  $c$ 의 속력으로 다가올 것입니다.

#### <철수가 $0.5c$ 의 속력으로 영희에게서 멀어지는 경우>

철수가 영희에게 레이저를 쏩니다. 철수가 관측할 때, 빛의 속력은  $c$ 겠죠.

그러면 영희가 관측할 때, 레이저는  $c$ 의 속력으로 다가올 것입니다.

이처럼 빛의 속도는 모든 관성계의 관찰자에게 동일하게 측정됩니다.

빛이 방출되는 그 순간, 광원으로부터 분리되어 항상  $c$ 로 관측된다고 생각하면 됩니다.

철수만 움직이는 경우뿐만 아니라 영희가 함께 움직이는 경우도 마찬가지입니다.

※ 물론, 영희가 움직인다는 것은 지면에 대해 움직이는 것입니다.

단순히 가시광선, 자외선, 감마선 같은 것만 그런 것이 아니라 전자기파가 모두 그렇습니다.

전파나 마이크로파도 모두 진공에서는 항상  $c$ 의 속력으로 관측됩니다.

사실은  $c$ 의 속도로 움직이는 모든 것이 그렇다고 보시면 됩니다.

빛의 속력은 철수의 좌표계든, 영희의 좌표계든, 우주선의 좌표계든, 지면의 좌표계든 빛에 다가가든 멀어지든 어디서 관측해도 모두 같습니다.

그래서 빛이 A에서 출발하여 B에 도달하는데 걸리는 시간 간격  $\Delta t$ 는

빛이 이동한 거리  $L$  을 이용하면  $\Delta t = \frac{L}{c}$  인데  $c$ 가 상수이므로  $\Delta t \propto L$ 입니다.

이처럼 빛이 이동한 시간은 빛이 이동한 거리를 이용하면 쉽게 비교할 수 있습니다.

실제로 비교하는 것은 나중에 사례들을 살펴보면서 차근차근 해봅시다.

마지막으로 알아두어야 할 내용은 시계의 **동기화**라는 개념입니다.

특수상대성이론 문제에서 시계를 측정한다는 것은 사건을 측정하는 것을 의미합니다.

시계가 있는 위치가 사건이 발생한 위치가 되고

시계 바늘이 가리키는 시각이 사건이 발생한 시각이 되는 것입니다.

따라서 '사건 하나 = 시계 하나'라고 보아도 무관합니다.

그런데 문제에서 사건이 하나만 있는 경우는 없습니다. 아무 의미가 없거든요.

어차피 개별적인 사건은 원점을 어떻게 정의했느냐에 따라서 값이 달라지므로

어느 좌표계든 원점을 사건이 발생한 그 점으로 일치시키면 사건이  $(0, 0)$ 으로 똑같아집니다.

관찰하는 좌표계에 따라 달라지는 것은 개별 사건이 아니라 사건 사이의 간격입니다.

이에 대한 내용은 후에 시간 팽창과 길이 수축으로 이어집니다.

다시 본론으로 돌아와서, 간격이 정의되기 위해서는 적어도 두 개의 사건이 있어야 하고

이는 적어도 두 개의 시계로 관측을 해야 한다는 말입니다.

※ 물론 시계가 없어도 사건을 관측할 수 있잖아요? 라고 물을 수도 있습니다.

여기서 말하는 시계라는 것은 위에서 적었듯이 사실상 사건의 측정을 이미지화한 것입니다.

어차피 어떤 방법으로 측정해도 다 동등하기 때문에 그냥 시계라고 부르도록 합시다.

그런데 한 좌표계에서 두 개(혹은 그 이상)의 시계로 관측을 하기 위해서는

당연한 이야기이지만 두 시계가 동시에 가도록 맞추어야 합니다.

이처럼 두 시계가 항상 같은 시각을 가리키도록 맞추는 것을 동기화라고 합니다.

그런데 서로 다른 사건을 측정할 때 두 사건이 발생하는 위치는 같고 시간만 다르다면

시계 하나로 간단히 잴 수 있을 것입니다.

시계 두 개가 필요한 경우는 바로 두 사건이 발생하는 위치가 다른 경우입니다.

예를 들어서 우주선이 행성 A를 출발해서 행성 B에 도달하는 상황이 주어진다면

우주선이 A에서 출발하는 사건, 우주선이 B에 도달하는 사건 이렇게 두 사건을 재야합니다.

그러려면 행성 A와 행성 B에 미리 동기화된 두 시계를 가져다 두어야 합니다.

여기서 아무렇게나 맞추는 것이 가능하다면 이렇게 열심히 설명하지도 않았겠죠?

두 시계를 한 위치에서 맞추고 위치를 옮기는 것은 안 됩니다.

왜냐하면 한 위치에 있던 두 시계를 다른 위치에 놓으려하면 필연적으로

시계가 가속도 운동을 하게 되고, 상대론적인 효과 때문에 시계바늘이 어긋나게 됩니다.

따라서 두 시계에 빛이 도달하면 시계바늘이 움직이도록 세팅을 해놓은 뒤에

두 시계를 각 행성에 가져다 놓고 중앙에서 양 쪽으로 빛을 쏘아 보내면

두 시계에 빛이 동시에 도달해서 두 시계가 같은 시각을 가리키면서 돌아가게 됩니다.

그러면 동기화가 완료된 것입니다.

서로 다른 두 사건을 측정하는 경우, 이렇게 미리 준비된 시계가 있다고 두고 풀면 됩니다.

이것이 왜 중요한 지는, 역시 다음 칼럼에서 동시성의 상대성과 함께 살펴보도록 합시다.