

원심력 개념의 부정확한 적용 사례 연구

강동식^{*} · 김익준^{**} · 강영봉^{*} · 김규용^{*}

목 차	
I. 서 론	IV. 결 론
II. 이론적 배경	참고문헌
III. 원심력 개념의 부정확한 적용 사례	

힘의 개념은 학문에 따라 시각의 차이가 있을 수 있다. 원심력의 개념을 물리학의 이론으로 적용했을 때, 원심력 내용을 포함하고 있는 제7차 교육과정 교과서 중에서 고등학교 지구과학Ⅱ 교과서가 이 힘의 개념에 대하여 부정확하게 기술하는 부분이 있는 것으로 파악되었다. 이에 따라 이 연구는 원심력에 대하여 학생들이 오개념을 형성할 수 있는 가능성이 있어 그 교과 내용의 문제점을 물리학적으로 분석하고 이에 대한 올바른 개념을 제시하였다.

각종 교과서를 분석한 결과, 거의 모든 교과서에서 원심력은 관성기준계에서는 존재할 수 없는 힘의 개념임에도 불구하고 관성기준계에서 원심력 개념을 사용하고 있었다. 또한, 원심력은 실제로 존재하지 않는 가상력임에도 불구하고 실제적인 힘으로 여겨서 물리 현상을 설명하는데 도입되고 있었다.

특히, 전향력 단위에서는 관성기준계와 비관성기준계에 대한 운동의 차이점을 제시하고, 전향력은 비관성기준계에서 관찰되는 가상력임을 올바르게 설명하고 있지만 원심력 부분에서는 전혀 그렇지 않았다. 원심력은 비관성기준계에서만 기술되는 가상적인 힘임에도 불구하고 이 힘의 관찰 기준계가 관성기준계인지 비관성기준계인지 분명하지가 않았다.

이러한 점으로 볼 때, 학문 분야에 따라 개념의 차이는 있을 수 있지만 원운동에서 기술되는 원심력은 전향력 단위에서 설명된 것과 같이 비관성기준계에서 관찰되는 구심력과 평형을 이루는 힘으로 실제적인 힘이 아닌 가상력임을 확실히 할 필요가 있다고 본다.

* 제주대학교 사범대학 과학교육과 교수

** 서귀포여자중학교 교사

I. 서 론

힘은 운동의 변화에 대한 원인으로 모든 동역학의 기본 개념이다. 힘에 대한 물리적 정의는 주로 이 전체에 기반을 두는 경우가 대부분이다. 뉴턴의 운동 법칙에서 유래된 이 정의는 물론 힘에 대한 경험적인 정의를 담고 있으며 현대 물리학에서는 힘을 두 물체간의 상호작용 개념으로 대체하고 있다. 하지만 중·고등학교에서는 바로 이 뉴턴의 정의에 의한 힘의 개념만으로도 충분함으로 본 연구에서는 이러한 정의에 국한하고자 한다.

원운동을 설명할 때 나타나는 힘에는 원운동을 가능케 하는 구심력에 대한 이해가 필수적이다. 원운동이라 함은 질량 m 인 입자가 반경 r 인 원궤도를 돌고 있는 것으로, 그 속력은 일정할 수도 있고, 일정하지 않을 수도 있다. 이 경우에는 입자에 작용하는 구심력은 질량과 속도의 제곱에 비례하고 반경에 반비례한다. 만약 속력이 일정한 경우로 제한하면 등속원운동이 된다. 이때의 등속이라 함은 속도가 아니라, 속력의 일정함을 의미하며, 방향은 항상 원의 접선 방향을 가리킴으로 일정하지 않게 된다. 바로 이 방향을 변화시키는 힘이 구심력으로서 등속원운동에서 항상 작용하며 운동을 변화시키는 원인이 되고 있다.

뉴턴의 제 1법칙에 의하면 물체에 작용하는 알짜힘이 없으면 물체는 운동 상태를 그대로 유지한다. 처음 등속도로 운동하고 있으면 그대로 등속도 운동 상태를 유지시킨다. 만약 직선상을 운동하고 있으면 직선 운동을 계속할 것이며 운동궤도는 속도가 일정하게 유지되는 직선이 될 것이다.¹⁾ 여기에서 힘의 작용에 대한 오개념이 생길 가능성이 있는데, 일정한 직선궤도를 일정한 운동궤도로 이해함으로써 나타나는 개념의 충돌 때문이다. 일정한 운동궤도와 일정한 직선궤도는 엄연히 다른 것임에도 불구하고 학생들, 더 나아가서 교과서에서조차도 이를 구분하지 않는 경우가 있다.

원운동에서 나타날 수 있는 대표적인 오개념으로서 입자가 일정한 원궤도를 돌고 있음으로 입자에 작용하는 알짜힘은 없다는 것이고, 따라서 구심력을 상쇄시킬 또 다른 힘, 즉 원심력이라는 개념을 도입하게 된다. 하지만 이 경우에 일정한 원궤도는 일정한 직선궤도가 아니라는 사실을 분명히 하여야 한다.

그러면 회전기준계에서 도입된 원심력은 뉴턴역학에서 정의되는 힘의 개념과 일치하는가? 그렇지 않다. 첫째로, 이 힘은 현상을 설명하기 위한 보조수단으로 도입된 가상의 힘이라는 것이다.²⁾

가상의 힘이라 함은 실제로 관성기준계에서 보았을 때 작용하지 않는 힘이라는 것이다. 두 번째로 이 원심력에 대해서는 뉴턴의 제 3법칙인 작용-반작용의 법칙이 적용되지 않는다는 것이다. 원심력은 속도에 관계되지 않는 힘으로서, 실제적인 힘이라면 반작용이 있어야 한다.

그렇다면 원심력은 물리적 설명에서 어떤 의미를 갖는가?

이 개념은 비관성기준계에서 나타나는 현상을 쉽게 설명하기 위해서 도입됐으므로 그

역할을 설명하는 보조 개념으로 분명히 강조되어야 한다. 즉, 비관성기준계에서 관측되는 가상적인 힘이라는 사실을 분명히 한다면 보조 수단으로서 유용하게 될 것이다.³⁾

하지만 유사한 현상 모두에 적용시키고자 할 때 기준계에 대한 분명한 언급을 하여 신중하게 처리해야 할 필요가 있다.

힘에 관련된 교과 내용은 비록 학문적 관점에 따라 개념의 차이가 있을 수 있으나 물리학과의 연계가 필요한 부분이다. 중·고등학교 교과서 중에서 고등학교 물리Ⅱ 교과서와 고등학교 지구과학Ⅱ 교과서에서 원심력에 대한 내용이 기술되고 있지만 고등학교 지구과학Ⅱ 교과서에서는 물리학적 관점에서보다 현상 중심으로 기술되고 있다. 따라서 지구과학Ⅱ 교과서를 중심으로 물리학의 이론을 기초로 하여 원심력에 대한 개념의 부정확한 적용 사례를 고찰하고자 한다.

이 논문의 진행 순서는 다음과 같다. Ⅱ장에서는 관성기준계, 비관성기준계에 대하여 정리하고 원심력에 관련된 내용에 대한 이론적 배경을 제시하고자 한다. Ⅲ장에서는 Ⅱ장의 이론적 배경을 토대로 흔히 잘못 이해하기 쉬운 경우를 제시하고 이를 이론과 맞게 재구성할 것이며, 구체적으로 지구과학Ⅱ 교과서를 중심으로 잘못 적용된 사례와 불분명한 예를 찾아서 고찰하고자 한다. 그리고 마지막으로 결론을 내리고자 한다.

Ⅱ. 이론적 배경

원심력은 원운동에 관한 내용을 기술하면서 많은 부분에서 힘의 개념으로 사용되고 있다. 예를 들면, 일상생활에서 이용되고 있는 원심분리기, 세탁기 등의 원리로서, 조석현상의 원인 중 한가지로써, 또는 원운동하는 기준계에 있는 관찰자에게 느껴지는 관성력으로 구심력과 반대 방향으로 나타나는 힘으로써 원심력이 도입되고 있다.

이 힘의 개념은 물리학 또는 지구과학 등 학문에 차이에 따라 시각의 차이가 있을 수 있다. 그러나 이 연구에서는 학문에 따른 관점의 차이는 고려하지 않고 물리학적 관점에서 원심력 개념의 부정확한 적용 사례를 분석하고자 한다. 따라서 이 장에서는 물리학의 이론을 바탕으로 원심력 및 원심력과 관련된 개념들, 즉 관성기준계, 비관성기준계, 힘의 개념, 구심력, 전향력을 정의하였다.

1. 관성기준계

입자의 운동을 기술하려면 기준계가 필요하다. 기준계는 임의의 순간 입자의 위치, 속도, 가속도를 명시하는데 사용될 공간에서의 좌표계이다.

기준계들 중에서 뉴턴의 제 1법칙이 성립하는 기준계를 관성기준계라고 부른다. 물체에 힘이 작용하지 않으면 그 물체는 정지 상태로 있거나 직선상에서 등속운동의 상태를 유

지한다. 이 법칙에 의하면 가속되는 기준계는 관성기준계가 아니라고 규정하게 되는데, 가속되는 기준계에서 상대적으로 정지해 있거나 일정한 속도로 움직이는 물체는 다른 기준계에서 볼 때 가속 운동으로 관찰되기 때문이다. 관성의 개념과 뉴턴의 운동법칙에 근거하여 가속기준계에서의 정지한 물체가 외형상 가속도가 없다는 것을 설명할 목적으로 흔히 “가상적” 힘을 고안해 내게 된다.

우선 일상생활에서 경험하게 되는 비관성기준계의 보기를 들어서 “가상적” 힘에 대한 예를 하나 들어 보기로 하자. 도로를 따라서 가속하고 있는 버스 안에 관측자가 앉아 있다고 하자. 이 버스 천장에는 추가 매달려 있다. 관측자에게 이것이 어떻게 보이겠는가? 버스 내의 관측자는 비관성기준계에 있다는 점을 유의하자. 그는 버스에 대해 상대적으로 정지해 있고 정지 상태의 추는 수직선에 대해 어떤 각도를 이룬 상태로 걸려 있게 된다. 중력과 연추선의 장력 이외에 다른 힘이 없다면 이 추는 수직방향이어서야 한다는 것을 관측자는 알고 있다. 실제로는 그렇지 않고 이 관측자는 추를 버스의 후방으로 밀거나 끄는 미지의 힘이 있다는 결론에 이르게 된다. 실제로는 가속하는 차를 타 본 사람은 모두 알고 있듯이 관측자 자신도 이러한 힘을 체험할 것이다.

그러면 우리가 정한 기준계가 관성기준계인지 아닌지를 판단하는 문제는 간단하지 않다. 물체에 작용하는 모든 외부 작용력이 배제되었다는 것을 알아야 관측자는 자기의 기준계가 뉴턴의 제 1 법칙을 따르는지의 여부를 점검할 수 있는데 물체들을 서로 무한히 멀리 놓여 있게 하지 않는 한 항상 중력이 작용하기 때문에 이것은 불가능하다.

그렇다면 완전한 관성기준계는 존재하는가?

실제로 대부분의 경우 지표면에 고착된 기준계는 근사적으로 관성기준계라 할 수 있다. 보기로 당구공을 보면 다른 공과 충돌하거나 당구대의 쿠션에 부딪히지 않는 한 직선 상에서 일정한 속도로 움직이는 것 같다. 그렇지만 그 운동을 매우 정밀하게 측정한다면 경로가 약간 굽게 움직이는 것을 알게 될 것이다. 이유는 지구가 회전하고 따라서 지표면도 가속되기 때문이다. 그러므로 지표면에 고정된 기준계는 관성기준계가 아니다. 좀 더 좋은 방법은 지구의 중심을 기준계의 원점으로, 태양과 항성을 고정점으로 하여 좌표축을 정하는 것이다. 그러나 태양 주위를 도는 지구의 공전 운동 때문에 이것도 관성기준계는 아니다.

그렇다면 태양의 중심에 원점을 두고 두 항성을 고정점으로 하는 기준계를 생각해 볼 수 있다. 엄밀한 의미에서는 이것도 관성기준계가 될 수 없다. 태양과 항성들은 은하계 내에서 전체적으로 회전 운동을 하고 있기 때문이다. 이번에도 회전하는 기준계이다. 완전한 관성기준계를 찾기 위해 이러한 탐색을 계속할 수 있지만 그때마다 같은 문제에 부딪치게 된다.

보기로 우리 은하계도 안드로메다 은하계를 포함한 여러 무리의 은하계 중 한 개에 불과하며 전체적으로 그 중심을 축으로 회전 운동을 하고 있다. 이 은하계 무리도 더욱 큰 처녀자리 은하계 군의 일부인데 그 중심까지의 거리는 20Mpc 이나 된다. 이 은하계군도 회전운동을 하고 있다.

따라서 실제 우주에는 정확히 영의 가속도를 가진 관성기준계는 존재하지 않는다고 볼 수 있다. 그러나 실제 응용에 있어서는 천체 기준계를 관성기준계로 취급하여도 무방하다.

궁극적으로 우주에 있는 모든 물질의 평균적인 배경에 기준계를 택할 수 있다. 일반적인 뉴턴 역학의 개념으로는 이러한 기준계가 우리가 생각할 수 있는 궁극의 관성기준계라고 믿게 된다.⁴⁾

물리학의 법칙들과 관성기준계와는 어떤 관계가 있을까? 이는 다음과 같은 표현으로 나타낼 수 있다. “물리학의 기본 법칙은 모든 관성기준계에서 동일하다.”로 표현되는데 갈릴레오와 뉴턴 역시 이 상대성원리를 알고 있었으며 아인슈타인은 이것을 자신의 특수 상대성원리의 제1원리로 삼았다. 이 표현의 의미를 살펴보기로 하자.

사람이 등속도로 달리는 차 안에 있다고 하자. 만약 차 안에서 사람의 머리 높이에서 동전을 차 속에서 떨어뜨린다면 그 동전은 어디에 떨어질까? 그것은 바로 아래로 떨어져 떨어뜨린 지점 바로 아래의 바닥에 떨어진다.(만약 물체를 차창 밖에서 떨어뜨린다면 움직이는 공기에 의해 뒤로 끌려 이러한 일은 일어나지 않는다.) 이것이 바로 물체가 땅 위에서 떨어지는 방법이며 움직이는 차에서 우리가 했던 실험은 상대성 원리와 일치한다.

그러나 이 예에서 땅 위에 있는 관측자에게는 물체는 수직으로 떨어지는 것이 아니라 앞으로 나아가면서 떨어지는 것으로 관측한다. 즉 물체의 위치와 속도는 관측자에 따라서 다르게 보인다. 하지만 운동의 법칙을 나타내는 가속도는 위의 예에서 두 경우 모두 같다. 상대성원리는 물리학의 모든 법칙들이 모든 관성기준계에서 같다는 것을 말하기 때문에 이것은 상대성원리에 위배되지 않는다. 양쪽 기준계에 같은 중력법칙과 같은 운동법칙이 적용된다.

말하자면 힘, 질량 그리고 가속도 어느 것도 관성기준계에 따라 변하지 않으므로 뉴턴의 제 2 법칙은 변하지 않는다. 그래서 그것은 상대성 원리를 만족한다. 다른 역학 법칙 또한 상대성 원리를 만족한다는 것을 보이는 것은 쉬운 일이다.

역학 법칙들이 모든 관성기준계에서 같다는 것은 한 관성기준계가 어떤 의미로는 특별하지 않다는 것을 의미한다. 이 중요한 결론은 역학적 현상을 설명하는데 있어서 모든 관성기준계는 동등하다로 표현된다. 어떠한 관성기준계도 다른 것보다 더 특별한 것은 아니다. 등속도로 움직이는 차나 비행기에 고정된 기준계는 땅 위에 고정된 기준계와 마찬가지로 지이다.⁵⁾

2. 힘

물체의 모양이나 운동 상태를 변화시키는 원인이 되는 것을 힘이라 한다. 우리가 물체를 들어 올릴 경우에는 감각으로 알 수 있으나, 그 외의 경우는 물체에 나타나는 현상으로 판단한다. 물체에 힘을 주면, 그 물체의 모양, 속도, 부피, 밀도 등이 변할 수 있다.

물체가 힘을 받아 모양이 변하는 것을 변형이라 한다. 변형의 정도는 힘을 많이 받을수록 크고 물체의 단단하기에 따라 달라진다. 변형의 종류에는 휨, 찌그러짐, 깨짐, 부서짐,

늘어남, 비틀림, 오프라듐, 구겨짐 등이 있다.

물체의 속력이나 운동방향이 변하는 것을 운동 상태의 변화라 한다. 물체의 운동 상태를 변화시키려면 반드시 힘이 필요하다. 힘이 클수록 운동 상태의 변화도 크다.

물체에 힘을 작용하면 다음과 같은 운동 상태의 변화가 나타난다.

- ① 정지한 물체가 운동하기 시작한다.
- ② 운동하던 물체가 정지한다.
- ③ 물체의 운동 속력이 빨라진다.
- ④ 물체의 운동 속력이 느려진다.
- ⑤ 물체의 운동 방향이 바뀐다.

여기에서 운동 상태의 변화는 물론 관성기준계에서 관측되는 변화이다. 다음에 설명할 비관성기준계에서 관측하는 운동 상태의 변화는 반드시 힘이 작용한 결과로 볼 수 없는 경우가 많으며 본 연구에서는 이 경우의 예를 중점적으로 다루고자 한다.

힘의 정의와 관련된 중요한 물리적 개념 중에 하나가 작용 반작용 법칙이다. 이는 뉴턴의 제 3법칙으로 알려져 있으며 “모든 작용에는 크기가 같고 방향이 반대가 되는 반작용이 있다”는 말로 표현된다. 다시 말하자면 모든 힘은 쌍으로 존재한다는 것이다. 예를 들면 A라는 물체가 B라는 물체에 힘을 가하면 B 물체는 크기가 같고 방향이 반대가 되는 힘을 A에 가하게 된다. 이 법칙은 힘의 평형과 구별되어지는 개념임을 유의하여야 한다.

비관성기준계에서 나타나는 원심력이라는 겉보기 힘은 작용은 있으나 반작용이 없는 힘으로, 이런 이유로 가상적인 힘이라 불리고 있다.

물론 작용 - 반작용의 법칙은 유한 속도로 전파되는 속성을 가진 힘들에서는 성립되지 않는다. 대표적으로 전자기 현상에서 힘이 속도에 따라서 변하는 경우 이 법칙은 성립되지 않는다.⁴⁾

하지만 원격작용이 근사적으로 적용될 수 있는 영역에서는 잘 적용되는 법칙으로 이 논문에서 다루게 될 원운동이나 지구표면에서의 역학현상에는 힘과 관련하여 그대로 적용할 수 있다.

3. 비관성기준계

물체의 가속도는 모든 관성기준계에 대해 같은 값을 가지며, 따라서 뉴턴의 제 2 법칙도 똑같이 적용된다. 상대성 원리는 모든 관성기준계들이 역학적 법칙에 관한 한 동등하다는 것을 의미한다. 즉 다른 관성기준계보다 우선하는 기준계는 존재하지 않는다. 등속도로 운동하고 있는 버스의 경우 버스 기준계는 정지해 있는 도로 기준계와 같이 무한히 많은 관성기준계 중의 하나일 뿐이다. 자연계에는 소위 절대 정지기준계는 존재하지 않는 것으로 알려져 있다.

그러나 가속되는 기준계에서의 역학 법칙들은 관성기준계의 경우와 아주 다르다. 가속 기준계에서는 뉴턴의 제 2 법칙이 그대로 적용될 수 없다. 가속에 의한 가상력이 생기게

되며, 이 힘을 운동 방정식에 포함시켜야 한다. 즉, 가속기준계와 관성기준계 사이에는 엄연한 구분이 존재한다.

질량 m 인 공에 힘 F 가 가해져, 이 공이 도로 위에서 a 의 가속도를 갖는다면(도로를 관성기준계로 가정한다.) 뉴턴의 제2법칙에 의해, 다음 식을 얻게 된다.

$$F = ma$$

가속되고 있는 버스(가속도는 b)에서의 공의 가속도를 a' 이라고 한다면

$$F = ma' + mb$$

$$F - mb = ma'$$

으로 표현할 수 있다. 이때 F' 을

$$f = -mb$$

으로 정의하면 위 식으로부터

$$F + f = ma'$$

의 관계식을 얻게 된다. 위 식을 사용하여 우리는 가속도를 가진 버스 안에서의 운동을 논할 수 있다. 그러나 이때의 힘은 실제로 존재하는 힘 F 에 새로운 양 f 을 더해준 양이다. f 은 우리가 사용하는 기준계가 관성기준계에 대해 b 의 가속도를 갖기 때문에 생기는 양이며, 가상력(또는 겉보기힘, 관성력)이라고 부른다.

버스가 급정거를 할 때, 우리 몸이 앞으로 쏠리게 되는 현상을, 버스 기준계에서 해석하면, 바로 이 가상력에 의한 것이다. 그러나 물론 도로 위의 관측자에게는 이러한 힘은 존재하지 아니하며, 승객의 몸이 앞으로 쏠리는 것은 관성의 법칙에 의해 같은 속도로 계속 움직이기 때문이다.

가상력은 실제 존재하는 힘인 것처럼 느껴지나, 실제 힘과는 다르다. 가상력은 다른 입자에 의해 일어나는 것이 아니며, 가속기준계에서만 존재한다. 즉, 관성기준계에서는 가상력은 존재하지 않는다.⁵⁾

4. 구심력

입자가 일정한 속력 v 로 반지름 r 인 원궤도 상을 등속원운동을 한다면 그것은 입자가 원이 중심 방향으로 일정하게 가속되고 있기 때문이다. 이 가속이 원인을 구심 가속도라 하며 그 크기는 $a = v^2/r$ 같이 주어진다.

구심가속도를 설명하기 위해서는 원의 중심 방향의 구심력이 물체에 작용해야 한다. 이 힘의 크기는 일정하고 뉴턴의 제 2 법칙에 의해 $F = mv^2/r$ 이다.

만일 이 힘이 작용하지 않는다면 물체는 등속원운동을 할 수 없다. 구심가속도와 구심

력은 모두 벡터량인데 그 크기는 일정하지만 방향은 계속 변하며 언제나 원의 중심을 향한다. 예를 들면, 등속원운동 하는 물체가 줄 끝에서 돌고 있는 돌멩이라면 줄의 장력이 구심력이 된다. 지구 주위를 거의 등속원운동하고 있는 달에 작용하는 구심력은 지구가 잡아당기는 만유인력이 된다. 구심력은 새로운 종류의 힘은 아니다. 그것은 장력, 중력, 마찰력, 전자기력 또는 어떤 힘도 될 수 있다.

두 가지 경우의 등속원운동을 비교해 보자.

먼저 자동차가 커브 길을 도는 경우를 들 수 있다. 평평한 도로 위를 비교적 빠른 속력으로 달리는 차의 뒷 좌석 중앙에 사람이 타고 있다고 하자. 운전수가 갑자기 커브길 코너를 돌기 위해 왼쪽으로 틀었을 때 이 사람은 오른쪽으로 미끄러져서 차문의 안쪽에 부딪치게 된다. 어떻게 된 것일까?

차는 커브 길을 도는 동안 등속원운동을 한다. 이 원운동을 하는 구심력은 도로가 바퀴에 작용하는 마찰력이다. 구심력은 안쪽으로 향하고 크기는 $F = mv^2/r$ 로 주어진다.

만일 좌석에 의한 마찰력이 충분히 컸다면 이 사람은 좌석 중앙에 앉은 채로 등속원운동을 했을 것이다. 지상의 기준계에서 본다면 실제로 그 사람은 직선운동을 계속한 셈이고 반면에 타고 있던 좌석이 움직여서 차의 벽이 그 사람 쪽으로 온 것이다. 차벽이 밀어주는 것이 구심력이 되어 비로소 차의 등속원운동에 합류하게 되었다.

이번에는 무중력상태로 지구 위를 돌고 있는 우주선의 승객을 생각하자. 이 경우에는 어떻게 될 것인가? 승객과 우주선을 등속원운동을 하게 하는 구심력은 승객과 우주선을 잡아당기는 지구의 중력이다. 이 힘은 지구중심을 향하고 있고 크기는 $F = mv^2/r$ 과 같다.

자동차나 우주선의 두 경우 모두 구심력에 의해 등속원운동을 한다. 그러나 두 상황에서 사람들이 느끼는 것은 전혀 다르다. 차 속에서는 차벽에 부딪쳐 벽이 미는 것을 느낀다. 그러나 지구궤도 위의 우주선 속에서는 떠있는 것 같이 아무런 힘도 느끼지 못한다. 왜 이렇게 큰 차이가 있을까?

그 차이는 두 구심력의 특성 때문이다. 차 속에서의 구심력은 차벽에 닿은 몸의 일부분에 벽이 직접 밀어주는 접촉힘이다. 우주선에서의 구심력은 몸속의 모든 원자들과 우주선의 모든 원자들을 질량에 비례하는 크기로 잡아당기는 부피힘인 지구중력이다. 따라서 우주선의 승객의 경우 몸의 일부분을 누르는 아무런 힘도 느끼지 못하는 것이다.⁴⁾

5. 원심력

실험실에 고정된 기준계와 같은 관성기준계를 사용하여 원판 안의 질량 m 인 입자의 운동을 기술해 보자. 입자는 원판과 함께 일정한 속력 v 로 반지름 r 인 원궤도를 돌고 있으므로 원의 중심으로 향한, 크기가 v^2/r 인 가속도, 즉 구심가속도를 가질 것이다.

원판에서 다른 입자들이 이 입자에 미치는 힘들이 있다. 이들 힘의 합성력, \mathbf{F} 는 뉴

턴의 제 2 법칙에 의하면

$$\mathbf{F} = m \mathbf{a}$$

로 주어진다.

$\mathbf{a} = v^2/r$ 이므로 $\mathbf{F} = mv^2/r$ 이며 \mathbf{F} 는 가속도의 방향인 안쪽으로 향한다.

때로는 원판 자체를 하나의 기준계로 사용하는 것도 편리하기도 하며 자연스러울 것이다. 그러나 원판은 가속되는 계이므로, 그러한 회전 기준계에 어떠한 가상력들이 생기는가를 배워야 한다. 즉,

$$\mathbf{F} + \mathbf{F}' = m \mathbf{a}'$$

라고 하고서(여기서 \mathbf{F} 는 질량 m 에 실질적으로 작용하는 힘들의 합성력이며 \mathbf{a}' 는 회전기준계에 대한 m 의 가속도이다.)

\mathbf{F}' 의 표현을 찾고자 한다. 위에 고려한 원판의 경우에는 식

$$\mathbf{F} + \mathbf{F}' = m \mathbf{a}'$$

을 적용할 수 있다.

안쪽으로 향한 실제 힘 $\mathbf{F} = mv^2/r$ 이 작용할 때 질량 m 의 입자는 원판과 함께 돌게 되며, 따라서 원판에 대해서는 정지한 상태가 되므로, 원판에 대한 가속도 \mathbf{a}' 는 영이라는 것을 알고 있다.

이 사실을 식

$$\mathbf{F} + \mathbf{F}' = m \mathbf{a}'$$

에 대입하면,

$$\mathbf{F} + \mathbf{F}' = m \times 0 = 0$$

을 얻는다. 그러므로 \mathbf{F}' 는 바깥쪽으로 향하며 크기는 mv^2/r 이다. 이 가상력을 특별히 원심력이라고 부른다.

다시 말하면, 회전하는 기준계에는 크기가 mv^2/r 이며 회전축으로부터 바깥쪽으로 향하는 가상력이 질량 m 인 입자에 작용한다.(v 는 반경 r 에서 관성기준계에 대한 회전 기준계의 속력이다.)

불행히도 원심력이란 용어가 가끔 부정확하게 쓰인다. 관성기준계에는 원심력이 없고 원심력이란 단지 회전하는 기준계에서만 생기는 기준계의 힘이다. 이는 대상 물체의 관성 때문에 생기는 것이다.

멀리 떨어진 별들에 대해 회전하지 않는 "천체 기준계"에서 보면, 지구는 하루에 한 번씩 회전하는 것처럼 보일 것이다. 실험에 의하면 "천체 기준계"는 거의 완전한 관성기준계이다.(힘을 받지 않는 물체는 이 기준계에 대해서 거의 등속도 운동을 한다.) 그러므로 지구에 고정된 어떠한 기준계도 엄밀히 말하면 관성기준계가 아니며 정확히 운동을 계산

하자면 가상력을 포함해야 한다.³⁵⁾

그래서 야구장에 고정된 기준계에 대한 야구공의 가속도 \mathbf{a}' 을 구하기 위하여, 뉴턴의 제2 법칙은

$$\mathbf{F} + \mathbf{F}' = m \mathbf{a}'$$

의 형태로 표시되어야 한다.

이 경우에는

$$m \mathbf{g} + \mathbf{F}' = m \mathbf{a}'$$

로 되며 여기서 $m \mathbf{g}$ 는 야구공에 작용하는 중력이다. 그러므로 야구공의 가속도 \mathbf{a}' 은 중력장 \mathbf{g} 와 완전히 일치하지 않으나 그 차이는 아주 작다. 원심력에서 생기는 부분은 적도 상에서는 g 의 0.34%이고, 극지방에서는 영이다.

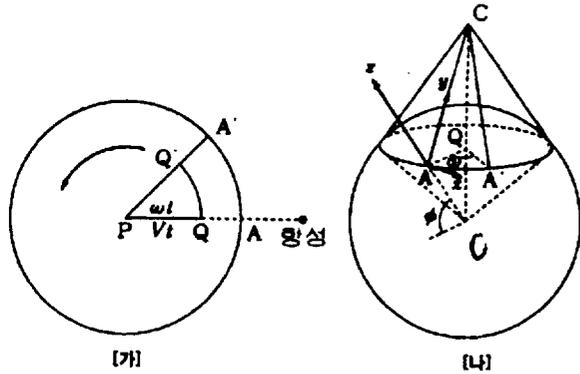
원운동에 대하여 흔히 가질 수 있는 잘못된 개념은 원심력의 존재에 관한 것이다. 줄에 달린 공을 돌리면 손은 공에 의한 바깥 방향의 힘을 느낀다. 그러나 이 힘은 공에 작용하는 힘이 아니다. 실제로 공을 바깥 방향으로 가속시키는 힘, 즉 원심력은 존재하지 않는다. 이와 같은 사실은 줄이 끊어질 때 공이 날아가는 방향으로부터도 쉽게 알 수 있다. 줄이 끊어지면 공은 순간 속도의 방향(원의 접선방향)으로 직진한다.

자동차가 커브 길을 달릴 때에도 비슷한 현상이 일어난다. 차 안의 승객은 마치 원심력이 있는 것처럼 느끼지만, 실제로 그런 것은 아니다. 다만 차가 커브를 트는 데 비하여 승객은 직진하려는 경향이 있을 뿐이다. 승객이 커브 경로를 따르게 하기 위해서는 구심력이 있어야 하는데 이 힘은 차의 의자 및 문짝이 공급한다. 물론 자동차에도 구심력이 가해져야 한다. 만일 길이 경사져있지 않다면 타이어와 길바닥의 마찰력이 구심력이다. 따라서 바닥이 미끄러우면 자동차는 커브를 따라 돌지 못하고 직선으로 운동하여 길을 벗어나게 된다.⁴⁾

6. 전향력

회전기준계에서 정지하고 있는 질점을 고정된 기준계에서 보는 경우 겉보기 힘으로 원심력만을 생각할 수 있으나 회전기준계에서 운동하는 질점에 대해서는 이론상 또 하나의 겉보기 힘이 작용해야 한다. 이 힘을 프랑스 물리학자 G.G. 코리올리의 이름을 따서 코리올리힘이라고 한다. 이와 같이 겉보기 힘으로 원심력과 코리올리힘을 도입하면 회전기준계를 관성기준계와 같이 취급할 수 있으므로 매우 편리하다. 지구상에서 운동하는 물체에 작용하는 코리올리힘을 예를 들어 설명하면 다음과 같다. 우리가 지구 북극 P점 그림 1.의 [가]에 있고 지구와 함께 회전한다고 가정하자. 이때 시작 $t=0$ 의 순간에 PA방향으로 즉 특정한 항성 방향으로, 물체를 초속도 V 로 발사하면 물체는 t 에서 Q에 도달하며 A방향으로 날아간다. 그 사이에 우리가 서 있는 지구도 회전하고 있으므로 북극에 고

정된 우리의 정면은 PA'의 방향을 향하게 된다. 만약 지구 자전이 일어나지 않는다면 Q'에 있어야 할 물체가 오른쪽 Q로 Q'Q만큼 밀려난다. 이와 같이 지구가 움직이지 않을 때 물체에 다른 힘이 작용하여 그 방향을 변동시켰다고 생각하는 경우 그 겉보기 힘을 코리올리힘이라 한다. <그림 1>의 [가]에서 코리올리힘의 가속도는 $2Vw$ 이다. 그러나 실제 지구는 거의 구(球)이므로 <그림 1>의 [나]에서와 같이 임의의 위도 ϕ 에서 코리올리 가속도는 $2Vwsin\phi$ 이다. 즉 코리올리힘은



<그림 1> 코리올리의 힘

극에서는 $sin\phi = 1$ 로 최대, 적도에서는 $sin\phi = 0$ 이 된다. 지구 자전에 따른 코리올리힘은 지구 위를 날아가는 모든 물체에 작용된다. 지구 대기 중 수평방향의 기압경도가 있을 때 공기는 우선 기압경도 방향으로 움직이기 시작하며 점차 속도가 증가한다. 코리올리힘은 속도에 비례하므로 점차 그 영향을 받게 되어 북반구에서는 오른쪽, 남반구에서는 왼쪽으로 밀린다. 마지막에는 기압경도력과 코리올리힘이 균형을 이루어 공기는 등압선을 따라 이동하게 된다. 이러한 효과는 해류나 바람의 방향을 변화시키므로 코리올리힘을 편향력 또는 전향력이라고도 한다. 푸코진자의 진동면이 회전하는 것도 지구 자전으로 코리올리힘을 받기 때문이다.⁶⁾

Ⅲ. 원심력 개념의 부정확한 적용 사례

원심력에 대한 내용은 고등학교 물리Ⅱ 교과서와 고등학교 지구과학Ⅱ 교과서에서 기술되고 있지만 부정확한 적용사례는 주로 지구과학Ⅱ 교과서에서 찾아 볼 수 있다. 이론적 배경에서 언급했듯이 지구표면에 있는 관측자는 회전기준계에 있으며 이로 인하여 그 관측자는 지구표면에 나타나는 현상들을 관성기준계에 있는 관측자와는 다르게 설명한다. 대표적인 물리현상들로는 전향력과 코리올리 효과, 원심력 등이 있다.

이와 관련하여 원심력에 대한 부정확한 적용 사례를 고찰하기 위하여 물리학적 관점에서 세 가지 기준을 정하였다.

첫째는, 어느 기준계를 기준으로 기술하고 있는가이다. 어떤 기준계인지 언급을 하지 않아도 물리 개념을 이해하는데 혼동이 없는 경우는 대개 기준계에 대한 설명을 생략한다. 하지만 원심력에 관한 내용이 현상을 설명하는데 필요한 경우는 어떤 기준계를 사용하고 있는지를 분명히 해주는 게 좋다.

둘째는, 비관성기준계에서 원심력을 실제로 물체가 받는 힘이 아닌 가상적인 힘으로 기술하고 있는가이다. 원심력은 가상적인 힘으로서 실제로 물체가 받는 힘이 아니다. 따라서 일상생활에 나타나는 힘들과는 구별해서 설명을 해줌으로서 학생들이 이 가상적인 힘에 대하여 오개념이 생기지 않을 것이다.

셋째는, 내용상 분명한 관성기준계임에도 불구하고 원심력 개념을 도입하고 있는가이다. 이에 해당되는 대표적인 경우가 원운동이다. 줄에 매달린 물체가 일정한 원궤도를 그리며 운동하는 이유는 줄이 물체를 잡아당기는 구심력과 크기는 같고 방향이 반대가 되는 원심력이 작용하기 때문이다라는 식의 설명이 많이 제시되고 있다. 관성기준계에서 본 원운동은 오직 구심력만이 물체에 작용하여 물체의 운동방향이 변하는 가속운동으로 원심력이 전혀 개입될 여지가 없다. 관성기준계에서는 원심력 개념을 사용해서는 안 된다.

원심력 기술 내용이 이상의 세 가지 기준에 부합하는가를 토대로 현재 고등학교에서 사용되고 있는 지구과학Ⅱ 교과서를 중심으로 원심력에 대한 부정확한 적용사례들을 교과서 단원 순서에 따라 구체적으로 지적하여 보고자 한다. 교과서의 내용 중 원심력과 관련 없는 부분은 생략하였으며 원심력과 밀접한 관계가 된 내용은 진한 글자체로 처리하였다. 또한, 내용이 같거나 또는 비슷한 것끼리 같은 어깨번호를 부여하여 주로 이 부분을 분석하였고 그 결과를 기술하였다.

1. '중력장'과 관련된 단원 내용 분석

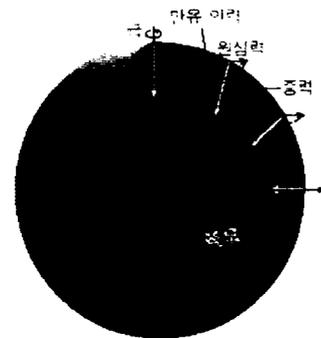
1) 중앙교육진흥연구소 교과서

... (중략) ...

또한, 지구상에 있는 모든 물체는 지구 자전 때문에 원심력을 받게 된다.^{A)} <그림 2>와 같이 지구상의 물체에 작용하는 만유인력과 원심력의 합력을 중력이라고 하고, 중력이 미치는 공간을 중력장이라고 한다.

만유인력은 지구의 중심을 향하지만 원심력은 지구 자전축에 수직으로 지구 밖을 향하므로,^{C)} 두 힘의 합력인 중력은 적도와 극을 제외하고는 지구 중심을 향하지 않는다.

...(중략) ...



<그림 2> 중력

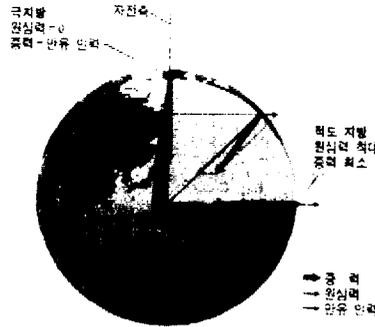
2) 지학사 교과서

지구상의 모든 물체는 지구에 의한 만유인력과 지구의 자전에 의한 원심력을 받고 있다.^{A)}

... (중략) ...

한편, 지표상의 물체가 지구 자전에 의해 받는 원심력의 크기는 자전축과의 거리에 비

례한다.^{B)} 따라서 원심력은 <그림 3>과 같이 반지름이 가장 큰 적도에서 최대가 되며, 고위도로 갈수록 작아져서 극에서는 0이 된다. 중력은 만유인력과 원심력의 합력이므로 적도에서 극으로 갈수록 커지며, 적도와 극지방을 제외한 지역에서 중력의 방향은 지구의 중심을 향하지 않는다.



<그림 3> 위도에 따른 중력의 크기와 방향

3) 금성출판사 교과서

지구의 중력은 지구 대기는 물론 지구상의 모든 물체에 작용하여 안정한 상태로 존재할 수 있게 해준다.

... (중략) ...

중력은 <그림 4>와 같이 만유인력과 합력에 의해 나타난다.

... (중략) ...

또, 지구 자전에 의한 원심력^{A)}은 회전 반지름이 큰 적도에서 최대이고, 극에서는 작용하지 않는다.^{B)} 원심력은 지구 자전축에 직각 방향으로 지구에서 멀어지는 쪽으로 작용한다.^{C)}

... (중략) ...

정밀한 중력계로 지구 중력을 측정하여 보면 중력의 크기가 장소에 따라서 다르게 나타난다. 그 까닭은 지구가 구가 아니고 타원체이며, 지구가 자전하므로 원심력이 위도에 따라 다르기 때문이다.^{B)}

... (중략) ...

4) 대한교과서 교과서

지구상의 모든 물체와 지구 사이에는 만유인력이 작용한다.

... (중략) ...

또 지구상의 물체는 자전에 의한 원심력을 받는다.^{A)} 원심



<그림 4> 중력의 방향과 크기



<그림 5> 중력의 분포

력의 크기는 위도에 따라 달라지는데, 극에서는 0이 되고 적도에서는 최대가 된다.^{B)}

중력은 만유인력과 원심력을 합한 값이다. 그러므로 중력은 적도에서 가장 작고, 극 쪽으로 갈수록 커진다.

5) 교학사 교과서

지표상의 모든 물체와 지구 사이에는 만유인력이 작용한다.

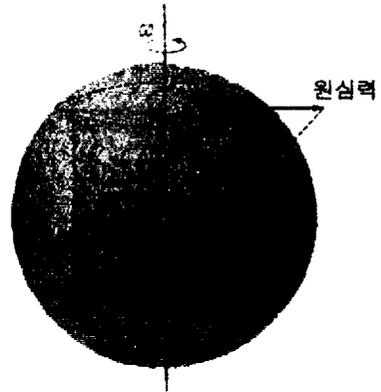
... (중략) ...

또한, 지표상의 모든 물체는 지구의 자전에 의한 원심력을 받는다.^{A)} 원심력의 크기는 자전축으로부터의 거리에 비례하므로 적도에서는 최대이고, 극에서는 0이다.^{B)}

따라서, 지표상의 물체는 지구의 질량에 의한 만유인력과 지구의 자전에 의한 원심력을 동시에 받는다. 그러므로 지구상의 물체에 작용하는 만유인력과 원심력의 합력을 중력이라고 한다.

... (중략) ...

원심력은 극지방으로 갈수록 작아진다는 것을 알 수 있다.^{B)} 따라서, 만유인력과 원심력의 합력인 중력도 적도에서 극지방으로 갈수록 커진다.



<그림 6> 지구의 중력

<표 1> '중력장' 관련 단원 내용 요약

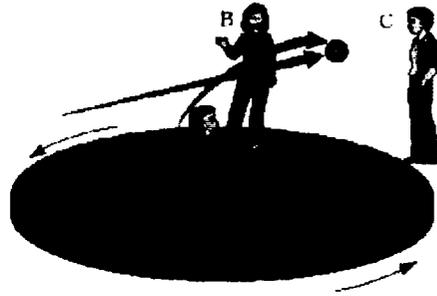
소단원명	출판사명	내 용 요약
중력장	중앙교육 진흥연구소	- 지구상의 물체는 자전 때문에 원심력을 받음 - 원심력의 방향은 지구자전축에 수직으로 지구 밖으로 향함
지구의 중력장	지학사	- 지표상의 물체가 지구 자전에 의해 받는 원심력은 자전축과의 거리에 비례
중력장	금성 출판사	- 지구 자전에 의한 원심력은 회전반지름이 큰 적도에서 최대 - 원심력은 지구자전축에 직각 방향으로 지구에서 멀어지는 쪽으로 작용
중력장	대한 교과서	- 지구상의 물체는 자전 때문에 원심력을 받음 - 원심력의 크기는 위도에 따라 달라짐
중력의 정의	교학사	- 지표상의 모든 물체는 지구 자전에 의한 원심력을 받음 - 원심력의 크기는 자전축으로부터 거리에 비례 - 원심력 $F = rw^2$

이 단원에서 모든 교과서는 원심력의 개념 정의 없이 A)와 같이 지구의 자전에 의해 원심력이 작용하고 있다고 기술하고 있다. 또한, B)와 같이 원심력의 크기는 원운동의 반지름에 비례하는 것으로 표현하고 있어 실제로 존재하는 힘인 것처럼 나타내고 있다. 원심력은 알짜힘이 아니라 가상적인 힘, 즉 가상력임을 암시하는 부분이 전혀 없다. 특히, 중앙교육진흥연구소와 금성출판사의 교과서는 C)와 같이 원심력의 방향을 구심력의 방향과 반대 방향으로 기술하고 있는데 이때는 관측자의 기준을 확실히 할 필요가 있다. 이미 이 단계에서 원심력에 대한 잘못된 개념을 형성할 가능성이 크다.

2. '전향력' 단원 내용 분석

1) 중앙교육진흥연구소 교과서

<그림 7>과 같은 큰 회전판이 반시계 방향으로 회전할 때 A가 B를 향해 공을 던지면 공은 똑바로 날아가지만, 공이 운동하는 동안 회전판이 회전하기 때문에 공은 C에게 떨어진다. 이것을 원판 밖에 있는 C가 보면 공은 똑바로 운동한 것처럼 보이지만^{D)} A와 B는 원판의 회전을 감지하지 못하기 때문에 공이 운동 방향에 대하여 오른쪽으로 전향된 것처럼 보인다.^{E)} 이와 같은 겉보기 힘^{F)}을 전향력 또는 코리올리의 힘이라고 한다.



<그림 7> 전향력

2) 지학사 교과서

<그림 8>과 같이 북반구 임의의 지점(P)에서 적도 위의 X0 지점을 향하여 물체를 발사했다고 가정하자. 우주에서 지구를 보면 물체는 최초의 방향(X0)으로 똑바로 날아가고 있다.^{D)} 그러나 물체가 날고 있는 동안 지구가 자전하므로 물체는 X0지점의 왼쪽인 X1 지점에 떨어질 것이다.^{G)} 이와 같이 움직이는 물체는 지구의 자전의 영향으로 북반구에서는 원래 방향의 오른쪽으로 휘어져 날아간다. 이 때 속도의 변화는 없고, 방향만 변화시키는 이 가상적인 힘^{F)}을 코리올리의 힘 또는 전향력이라고 한다.

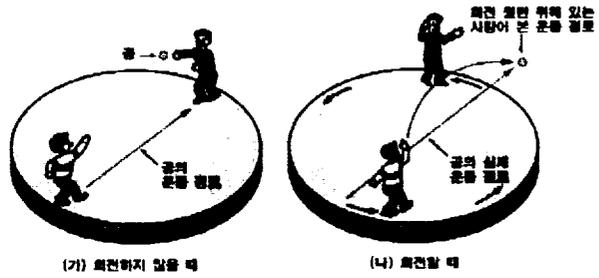


<그림 8> 전향력

3) 금성출판사 교과서

<그림 9>의 (가)에서 원반은 회전하지 않는다. 따라서 원반 끝의 한 사람이 던진 공은 맞은편 사람에게 직선으로 날아간다. 그러나 원반이 반시계 방향으로 회전하는 그림 (나)

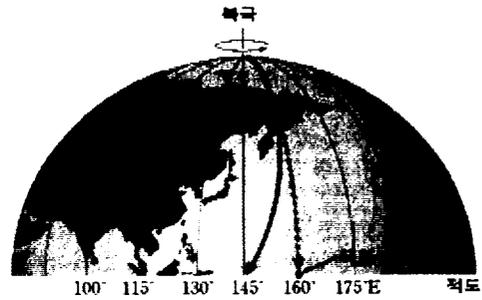
에서 한쪽 사람이 던진 공은 그림 (가)의 경우와 같이 직선으로 날아가지만^{D)} 공이 날아가고 있는 동안 원반이 반시계 방향으로 회전하기 때문에 처음 공을 던진 사람이 볼 때는 운동 경로가 오른쪽으로 휘어져서 관측된다.^{E)}



<그림 9> 회전 원반에서 공 던지기

... (중략) ...

<그림 10>과 같이 북극에서 적도 상에 있는 목표 지점을 향하여 로켓을 발사하고, 이 로켓이 적도에 도달하는 데 1시간이 걸린다고 하자. 로켓은 실제로 동경 160° 경도선을 따라 똑바로 날아가지만 로켓이 날아가는 동안 지구가 서쪽에서 동쪽으로 15°를 자전하였기 때문에 로켓은 동경 145°의 적도에 떨어질 것이다. 즉, 북극에 있는 사람이 볼 때는 로켓의 운동 경로가 오른쪽



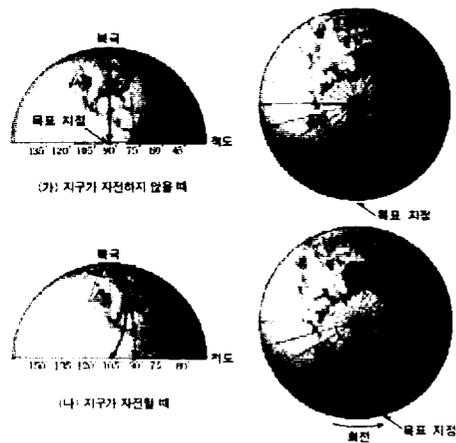
<그림 10> 북극에서 발사된 로켓의 전향효과

으로 휘어져 관측된다.^{E)} 이러한 현상을 코리올리 효과(Coriolis Effect)라고 하며, 이 효과에 의해 운동 방향을 휘게 하는 힘을 전향력 또는 코리올리 힘이라고 한다. 따라서 전향력은 실제로 작용하는 힘이 아니라^{F)} 지구상의 관측자에게만 나타나는 힘이다.^{E)} 즉, 지구 밖의 공간에서 관측한다면 물체의 운동 경로는 처음 운동을 시작한 방향과 같다.^{D)}

4) 대한교과서 교과서

지구가 <그림 11>의 (가)처럼 자전하지 않는다면 북극에서 적도 지방의 목표 지점으로 물체를 발사할 때 그 물체는 방향의 변화 없이 그대로 진행할 것이다. 하지만 <그림 11>의 (나)처럼 지구가 자전하고 있는 상태에서 극지방에서 적도 지방의 목표 지점으로 물체를 발사한다면 그 물체는 어떻게 될까?

자전하고 있는 지구의 북극에서 적도 쪽으로 공을 던질 때, 이것을 지구 밖에서 보면 공은 똑바로 운동하는 것처럼 보이지만^{D)} 북극에 있는 사람은 지구의 회전을 감지하지 못하므로 공이 운동 방향에 대하여 오른쪽으로 전향된 것으로 판단한다.^{E)} 이와 같은 겉보기 힘^{F)}을 전향력이라고 한다.



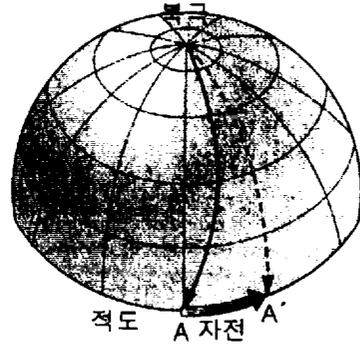
<그림 11> 전향력

5) 교학사 교과서

물체의 운동은 관찰하는 사람의 기준에 따라 다르게 나타난다.

... (중략) ...

이러한 현상은 자전하는 지구에서도 나타난다. <그림 12>에서와 같이 지구의 고위도에서 같은 경도상의 적도를 향하여 물체를 발사했다고 하자. 지구 밖의 관찰자가 볼 때 이 물체는 직선 운동을 하므로 아무런 힘도 작용하지 않았다고 할 수 있다.^{d)} 그러나 적도상의 관찰자는 물체가 운동하는 시간 동안 지구 자전에 의하여 AA' 만큼 이동하였으므로 물체가 뒤쪽에 떨어지는 것으로 보일 것이다. 따라서 고위도의 관찰자에게 물체는 목표 지점의 오른쪽으로 편향하여 진행되는 것으로 관찰된다. 그러므로 자전하는 지구상의 관찰자는 물체에 어떤 힘이 작용하여 운동 방향을 바꾼 것으로 보게 된다.^{e)} 이러한 현상을 코리올리 효과라 하고, 물체에 작용한 것처럼 보이는 가상의 힘을 전향력 또는 코리올리 힘이라고 한다.



<그림 12> 지구 자전의 효과

<표 2> '전향력' 관련 단원 내용 요약

소단원명	출판사명	내용 요약
전향력	중앙교육 진흥연구소	- 원판에서 공을 던질 때 원판 밖에서 보면 공은 직선운동한 것처럼 보이지만, 원판 위에서 보면 공이 휘어지는 것처럼 보이는 겉보기힘을 전향력이라 함
전향력	지학사	- 지구의 북반구에서 남쪽으로 물체를 발사시키면, 우주의 관측자는 직선운동을 하는 것으로 보이나, 지구의 자전으로 오른쪽으로 휘어져 나가는 것처럼 보이는 가상적인 힘을 전향력이라 함
전향력	금성출판사	- 북극에서 물체를 발사시키면 북극의 관측자는 운동경로가 오른쪽으로 휘어져 보이는데 이렇게 보이는 힘을 전향력이라 하며, 실제로 작용하는 힘이 아님 - 지구 밖에서 관측자하면 운동 경로는 처음 운동을 시작한 방향과 같음
전향력	대한교과서	- 북극에서 적도로 물체를 발사시키면, 지구 밖에서 보면 직선운동을 하는 것처럼 보이지만, 북극의 관측자는 운동방향에 대하여 오른쪽으로 전향된 것처럼 보이는 겉보기힘을 전향력이라 함
지구자전의 효과	교학사	- 지구의 고위도에서 저위도로 물체를 발사하면, 지구 밖의 관찰자는 직선운동을 하지만 지구의 관찰자는 운동방향이 바뀐 것처럼 보이는데 물체에 작용한 것처럼 보이는 가상적인 힘을 전향력이라 함

모든 교과서가 전향력을 설명하면서 어떤 기준계에서 관찰하느냐에 따라 물체의 운동이 달라진다는 것을 기술하고 있다. 전향력이란 D)와 같이 지구 밖의 관찰자(관성기준계)에 의해 나타나는 힘이 아니라, E)와 같이 지구상의 관찰자(비관성기준계)에 나타나는 힘으로 표현하면서 기준계 설정을 명확히 하고 있다. 또한, 전향력은 F)와 같이 실제로 존재하는 힘이 아니고 비관성기준계에서만 관찰되는 가상의 힘이라고 설명하고 있다. 단지 지학사 교과서만이 전향력을 기술하면서 G)와 같이 어떤 기준계를 적용하고 있는지 확실하지 않다. 하지만 앞뒤 문맥으로 보아 비관성기준계임을 추측할 수 있다. 이렇듯 전향력을 기술하면서 관측자의 기준이 표현되고 있고, 실제로 존재하는 알짜힘이 아닌 비관성기준계에서 관측되는 가상력임을 명확하게 정의하고 있다.

3. '원심력' 단위 또는 '구심력' 단위 내용 분석

1) 중앙교육진흥연구소 교과서

원운동을 하는 물체에서 원의 중심으로부터 밖으로 나가려는 힘을 원심력이라고 한다.^{H)} 물체를 실에 매어 돌리면 물체는 회전 중심으로부터 떨어져 나가려는 힘을 받는다. 그러나 돌이 떨어져 나가지 못하는 것은 떨어져 나가려는 방향과 반대 방향,^{K)} 즉 회전 중심 방향으로 실이 순간순간 당겨 주기 때문이다.

원운동을 하는 물체가 그 운동 방향을 바꾸어 주기 위해서는 원운동의 중심으로 향하는 힘이 필요하다. 이 힘을 구심력이라고 한다. 원심력과 구심력은 힘의 크기는 같고, 방향만 반대가 된다.^{L)}

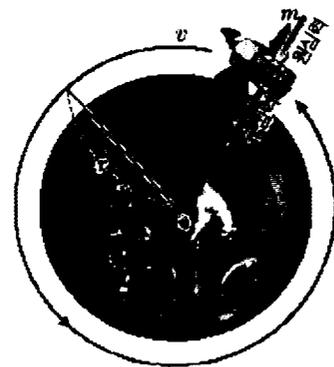
질량 m 인 물체가 회전 속도 v 로 곡률 반지름 r 주위를 원운동할 때의 원심력의 크기를 F 라고 하면, 그 크기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \frac{mv^2}{r}$$

2) 지학사 교과서

<그림 14>와 같이 작은 추를 줄에 매어 돌리면 추는 반지름이 일정한 원을 그리게 된다. 그러나 도중에 줄이 끊어지거나 줄을 그대로 놓아 버리면 추는 원의 접선 방향으로 날아간다. 따라서 추가 원운동을 계속 유지하려면 추가 떨어져 나가는 것을 막기 위해 중심 쪽으로 당겨 주는 힘이 작용해야 한다. 이와 같이 물체가 원운동하기 위하여 중심 방향을 작용하는 힘을 구심력이라고 한다.

공기 덩어리의 질량이 m , 회전속도를 v , 곡선 운동의 반지름을 r 라고 할 때, 구심

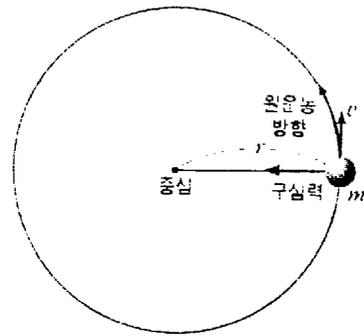


<그림 13> 원심력

력의 크기 C_p 는 다음과 같다.

$$C_p = \frac{mv^2}{r}$$

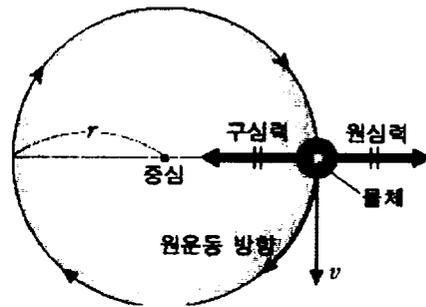
그런데 원운동을 하는 물체에서 원의 중심 방향으로 구심력을 받고 있음에도 등속 원운동을 유지하는 것은 구심력과 힘의 크기는 같고 방향이 반대인 힘^{H)}이 작용하고 있기 때문인데, 이 힘을 원심력이라고 한다.^{H)}



<그림 14> 구심력

3) 대한교과서 교과서

원운동을 하는 물체에서 원의 중심으로부터 밖으로 나가려는 힘이 원심력이다.^{H)} 줄에 매달려서 원운동을 하는 물체는 계속해서 운동 방향이 변화한다. 이렇게 운동 방향이 계속 바뀌기 위해서는 중심을 향해 작용하는 힘이 있어야 하는데, 이 힘을 구심력이라고 한다.



<그림 15> 구심력

대기를 포함하는 지구상의 모든 물체는, 우주에서 관찰했을 때 원운동을 하고 있으므로 구심력이 작용한다. 질량 m 인 공기 덩어리가 속

도 v , 각속도 w 로 반지름이 r 인 원 주위를 돌고 있을 때, 이 공기 덩어리에 작용하는 구심력 F_c 는 다음과 같다.

$$F_c = m \frac{v^2}{r} = mrw^2$$

지구 위의 관측자에게는 물체가 정지해 있는 것처럼 보이므로,^{J)} 구심력과 평형을 이루면서 지구 외부로 향하는 힘인 원심력이 존재한다. 원심력과 구심력의 힘의 크기는 같고, 방향은 반대이다.^{J)}

<표 3> '원심력' 관련 단원 내용 요약

소단원명	출판사명	내용 요약
원심력	중앙교육 진흥연구소	- 원운동하는 물체에서 원의 중심 밖으로 나가려는 힘 - 구심력과 힘의 크기는 같고 방향이 반대
구심력	지 학 사	- 원운동을 하는 물체에서 원의 중심방향으로 구심력을 받고 있음에도 등속원운동을 유지하는 것은 구심력과 힘의 크기는 같고 방향이 반대인 원심력이 작용하기 때문
구심력	대한교과서	- 원심력은 원운동하는 물체에서 원의 중심 밖으로 나가려는 힘 - 지구에 있는 관측자는 물체가 정지한 것처럼 보이므로 구심력과 평형을 이루는 원심력 존재

'전향력'과 관련된 단원에서는 물체의 운동은 관측자의 기준에 따라서 다르게 나타나며 전향력은 지구의 관측자(비관성기준계)에게 관찰되는 가상적인 힘이라고 정확히 기술되고 있다. 원심력도 전향력과 마찬가지로 비관성기준계에서 관찰되는 가상적인 힘이다. 그러나 이 단원에서는 H)와 같이 원심력에 대한 개념 정의는 되고 있지만 어떠한 기준계를 사용하고 있는지를 알 수 없고, I)처럼 구심력과 힘의 크기는 같고 방향이 반대인 힘으로 정의하고 있어 가상력이 아닌 실제로 존재하는 알짜힘으로 생각하기 쉽도록 설명되고 있다. 여기에서 원심력에 대한 오개념을 형성시킬 위험성이 크다고 볼 수 있다. 특히, 원운동에서 물체의 운동 방향은 원의 접선 방향 즉, 구심력과 수직 방향임에도 불구하고 중앙교육진흥연구소 교과서에서는 K)에서처럼 원운동의 방향을 구심력과 반대 방향으로 기술하고 있어 원운동의 운동 방향 자체에 오류를 범하고 있다.

단지, 대한교과서의 교과서에서만 J)처럼 원심력을 지구 위의 관측자(비관성기준계)에게 관찰되는 힘으로 표현하고 있다. 그러나 전체적으로 지문에 제시된 그림은 지구 표면의 비관성기준계인지 지구 밖에 설정된 관성기준계의 관측자가 설명하고 있는 것인지 분명하지 않다.

금성출판사의 교과서에서는 '기조력' 단원에서 참고 사항으로 기준계의 설명 없이 원심력은 물체가 회전 운동을 할 때 작용하는 구심력과는 방향이 반대이고 크기가 같은 가상적인 힘이라고 정의하고 있고, 교학사 교과서에서는 원심력에 대한 구체적인 기술 내용이 없다.

지구상에서 물체가 받는 힘에 원심력이 작용하고 있다는 설명은 '전향력' 단원에서 기술된 것처럼 지구표면에 있는 관측자가 관측된 현상을 설명하기 위하여 제시하는 방식임을 분명히 할 필요가 있다.

4. '기조력' 단원 내용 분석

1) 중앙교육진흥연구소 교과서

...(중략)...

<그림 16>에서 기조력은 달이 지구에 작용하는 만유인력과 지구와 달의 공통 질량 중심(G)을 중심으로 도는 원운동에 의해서 생긴 원심력의 합력이다. 지구 공전에 의한 원심력은 지구상의 모든 지점에서 그 크기와 방향이 같다.¹⁾



<그림 16> 기조력

...(중략)...

따라서 달 쪽에 있는 해수(B)는 원심력보다 달의 만유인력이 더 커서 달 쪽으로 부풀어 오르며, 달과 반대 방향에 있는 해수(A)는 원심력이 달의 만유인력보다 더 커서 달의 반대편으로 부풀어 오르게 된다.

2) 지학사 교과서

...(중략)...

<그림 17>과 같이 달은 지구 둘레를 공전하고, 이 때 지구의 중심 O는 지구와 달의 공통 질량 중심 G를 중심으로 원운동을 한다. 따라서 지구상의 모든 지점은 이와 같은 크기로 원운동을 하므로 원심력이 생기는데, 이 원심력은 지구상 어디에서나 크기와 방향이 같다.¹⁾

...(중략)...



<그림 17> 기조력의 원리 및 분포

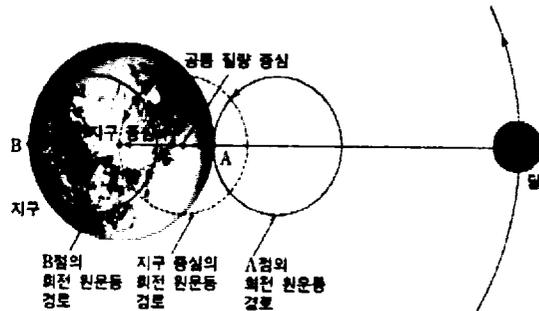
3) 금성출판사 교과서

...(중략)...

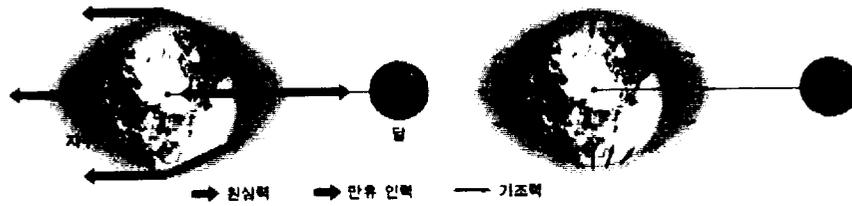
물체가 회전 운동을 할 때에는 회전 중심에서 멀어지는 방향으로 원심력이 작용하는데, 지구상의 어느 지점이나 같은 주기로 같은 크기의 원을 그리면서 회전하므로 모든 점에 작용하는 원심력은 같다.¹⁾

...(중략)...

<그림 19>와 같이 각 지점에서 달까지의 거리가 다르기 때문에 각 지점에 작용하는 달의 인력은 다르다. 달의 인력은 달과의 거리가 가까울수록 크므로 달에 가장 가까운 A지점에서는 가장 크고, 가장 먼 B점에서는 가장 작다. 결과적으로 각 지점에 작용하는 원심력은 모두 같으나 달의 인력이 다르므로 각 지점에 작용하는 달의 인력과 원심력의 차이가 생기게 되는데, 이 힘이 기조력으로 작용한다.



<그림 18> 지구와 달의 회전 운동



<그림 19> 기조력의 분포

A지점에서는 만유인력이 원심력보다 크므로 달 쪽으로 기조력이 작용하고, B점에서는 원심력이 만유인력보다 크므로 달 반대쪽으로 기조력이 작용하며 A점과 B에서의 기조력은 방향은 반대이나 크기는 같다.

...(중략)...

4) 대한교과서 교과서

...(중략)...

이에 따라 지구상의 각 지점에 원심력이 생기는데, 같은 원운동을 하므로 <그림 20>의 (가)와 같이 지구상의 어디에서나 원심력의 크기와 방향이 같다.¹⁾

...(중략)...

지구가 공통 질량 중심을 중심으로 원운동할 때 생기는 원심력과 ...(중략)...

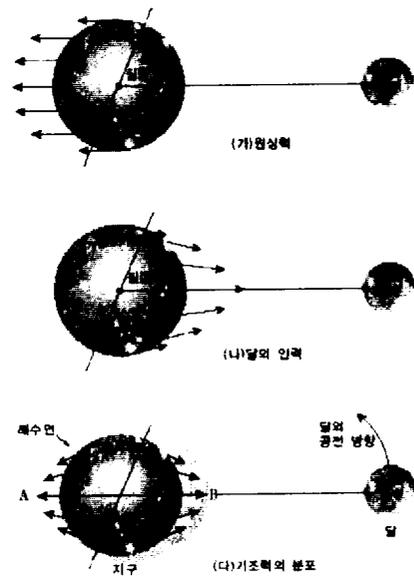
지구의 중심에서는 달의 인력과 원심력의 크기가 같으므로 기조력이 없다. 달을 향한 쪽에서는 달의 인력이 원심력보다 크므로 달 쪽으로 기조력이 작용하고, 달의 반대쪽에서는 원심력이 달의 인력보다 크므로 달의 반대쪽으로 기조력이 작용한다.

...(중략)...

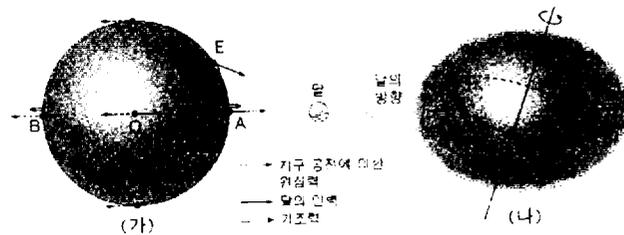
5) 교학사 교과서

기조력은 지구와 달 또는 지구와 태양 사이에 작용하는 만유인력과 원심력의 차에 기인하여 나타난다.

...(중략)...



<그림 20> 기조력



<그림 21> 기조력의 원인과 해수면의 상승

따라서 원운동하는 반지름이 같기 때문에 지구상의 어느 지점에서나 원운동으로 인하여 나타나는 원심력(L)은 같다.

...(중략)...

<표 4> '원심력' 관련 단원 내용 요약

소단원명	출판사명	내 용 요 약
기조력	중앙교육 진흥연구소	- 기조력은 달과 지구의 만유인력과 원운동으로 생긴 원심력의 합력
조석의 원인	지 학 사	- 지구가 원운동할 때 생기는 원심력과 달과 지구의 인력의 합을 기조력이라 함
기조력	금성출판사	- 원심력은 물체가 회전운동을 할 때 작용하는 구심력과는 방향이 반대이고 크기가 같은 가상적인 힘 - 기조력은 달과 지구의 만유인력과 원운동으로 생긴 원심력의 합력
조석	대한교과서	- 지구가 원운동할 때 생기는 원심력과 달과 지구의 인력의 합을 기조력이라 함
달에 의한 기조력	교 학 사	- 기조력은 지구상의 각 지점에서 원심력과 만유인력의 차이

달에 의한 조석 효과만을 예로 들면 달과는 반대 면에서 수면의 상승효과가 나타나는 현상에 대한 설명은 L)과 같이 '지구상의 어느 지점에서나 나타나는 원심력'이란 표현으로 마치 지구상의 관찰자가 기준이 되는 비관성기준계에서 나타나는 힘인 것처럼 보이지만 지구의 자전에 의한 원심력이 아니라 달과 지구의 공통 질량을 중심으로 하는 원운동에 의한 원심력이기 때문에 이 표현이 비관성기준계에서 표현되었다고 볼 수 없다. 또한, 어느 관찰자를 기준으로 하고 있는지 명확하지 않지만 지문의 그림을 분석하면 관성기준계를 기준으로 하고 있는 듯하다. 즉, 그림 상으로 볼 때 달과 지구를 관측 대상으로 해서 지구와 달의 외부에서 설명하고 있는 형태를 취한다고 볼 수 있는 상황이 대부분이다. 이는 관성기준계에서 원심력을 설명하는 식이므로 적합하지 못하다. 그러나 조석 효과의 경우 관성기준계에서의 설명이 쉬운 편이므로 이에 대한 설명을 제공하는 것이 바람직하다.¹²⁾

5. 분석 결과 종합

<표 5> 교과서에 기술된 전향력과 원심력의 비교

출판사명	구 분	기준점 설명	비관성기준계 기술	가상력 기술
중앙교육 진흥연구소	전향력	○	○	○
	원심력	x	x	x
지 학 사	전향력	○	△	○
	원심력	x	x	x
금성출판사	전향력	○	○	○
	원심력	x	x	○
대한교과서	전향력	○	○	○
	원심력	x	○	x
교 학 사	전향력	○	○	○
	원심력			

○ : 잘됨 △ : 정확치 않지만 표현됨 x : 안됨

<표 5>에서와 같이 모든 교과서에서 전향력 개념을 도입하기 전에 물체의 운동이 관찰자에 따라 달라짐을 설명하고 있고, 관성기준계와 비관성기준계에서의 운동의 차이점을 표현하고 있다. 또한 전향력은 비관성기준계에서 관찰되는 가상력임을 정확히 기술하고 있다.

그러나 원심력도 전향력과 마찬가지로 비관성기준계에서 관찰되는 가상력임에도 불구하고 원심력에 대한 설명에서는 전혀 그렇지 않다. 관찰자의 기준에 대한 언급이 전혀 없으며, 알짜힘이 아닌 비관성기준계에서 관찰되는 가상력임을 설명하는 부분도 없다. 단지 금성출판사 교과서에서 원심력은 원운동에서 나타나는 구심력과 크기가 같고 방향이 반대인 가상적인 힘이라는 설명이 되고 있다. 교학사 교과서에서는 원심력에 대한 구체적인 내용 기술이 없다. 전체적으로 볼 때 근본적으로 원심력 개념에 대하여 부정확하게 기술되고 있음을 의미하며 이것은 원심력에 대한 오개념을 형성케 하는 원인이 될 수 있다고 보여 진다.

IV. 결 론

원심력이라는 힘의 개념은 많은 부분에서 사용되고 있지만 중·고등학교 교과서 중에서 고등학교 물리Ⅱ와 고등학교 지구과학Ⅱ에서만 다루어지고 있었다. 원심력은 학문의 분야에 따라 그 개념이 다를 수 있지만 물리학과 연계가 필요한 부분으로 물리학의 이론을 기초로 할 때 이 힘을 인용함에 있어서 잘못 사용되고 있거나 부정확하게 사용되는 경우가 있었다. 더구나 고등학교 지구과학Ⅱ 교과서에서조차 정확하지 않은 설명이 제시되고 있어 원심력에 대한 오개념을 일으킬 수 있는 원인을 제공하고 있었다. 이에 따라 고등학교 지구과학Ⅱ 2종 도서 5종류의 교과서를 토대로 원심력 관련 부분을 분석하였고 그 결과를 바탕으로 한 결론은 다음과 같다.

첫째, 원심력은 관성기준계에서는 설명될 수 없는 힘의 개념임에도 불구하고 관성기준계에서 원심력 개념을 사용하고 있었다.

둘째, 원심력은 실제로 존재하지 않는 가상적인 힘임에도 불구하고 실제적인 힘으로 여겨서 물리 현상을 설명하는데 도입되고 있었다.

셋째, 전향력에서는 관성기준계와 비관성기준계에 대한 차이점을 제시하고 전향력은 비관성기준계에서 관찰되는 가상적인 힘임을 설명하고 있지만 원심력 부분에서는 전혀 그렇지 않았다.

넷째, 원심력은 비관성기준계에서 존재하는 가상적인 힘이지만 이 힘을 관성기준계에서 설명하고 있는지 비관성기준계에서 설명하고 있는지 분명하지가 않았다.

이러한 점들은 학생들로 하여금 원운동에서 기술하는 원심력은 비관성기준계에서 관찰할 때 구심력과 평형을 이루는 가상적인 힘으로 도입되었음에도 불구하고 원심력을 가상적인 힘이 아닌 실제적인 힘으로 여기게 만들 수 있다. 또한 원심력을 사용하지 말아야 할 곳에 이 힘의 개념을 사용하여 현상을 설명하게끔 만들 수도 있다. 따라서 이러한 오개념을 바로 잡고 현상에 대한 물리적 설명을 정확히 하는 것은 중요한 일이다.

본 연구에서는 어디까지나 물리학적 관점으로만 볼 때, 고등학교 지구과학Ⅱ 교과서에 나타난 문제점을 중심으로 원심력의 개념이 부정확하게 사용되고 있는 경우를 살펴보고, 이에 대하여 올바른 개념을 제시하였다.

앞으로 학생들이 원심력에 대한 이러한 오개념을 가지고 있지 않은지에 대해서도 구체적으로 조사할 필요가 있을 것이다.

참 고 문 헌

- 고려대학교의 5개 대학 공역(2003), 일반물리학, 개정6판, 범한서적주식회사
대학 물리교재편찬위원회 역(1996), 기초물리학, 범한서적주식회사.
K. R. Symon(1972), Mechanics, 3rd, Addison-Wesley Pb. Co.
김인목, 정광호 공역(2004), 수학없는 물리, 홍릉과학출판사.
H. Goldstein, C. Poole, and J. Safko(2002), Classical Mechanics, Addison-Wesley Pb.
Co.
파스칼세계대백과사전부편(2001), 파스칼세계대백과사전, 동서문화사
이규석외 5인(2003), 고등학교 지구과학Ⅱ, 대한교과서(주)
이문원의 5인(2002), 고등학교 지구과학Ⅱ, (주)금성출판사
경재복외 5인(2002), 고등학교 지구과학Ⅱ, (주)중앙교육진흥연구소
우종옥외 5인(2002), 고등학교 지구과학Ⅱ, (주)교학사
허창희외 3인(2003), 고등학교 지구과학Ⅱ, (주)지학사
박승재역(1988), 중력, 현대과학신서

<ABSTRACT>

A Study about Incorrect Use of Centrifugal Force

Dong-Shik Kang · Ik-Jun Kim · Young-Bong Kang · Kyu-Yong Kim

The concept of centrifugal force is presented differently among the different sciences. According to the viewpoint of physics, the idea of centrifugal force is presented incorrectly in the 7th curriculum's high school textbooks titled Earth Science II, which dedicates an entire chapter to centrifugal force. Thus, high school students introduced to centrifugal force will have received inaccurate information about this concept. The purpose of this study is to analyze the content on centrifugal force and to compare any incorrect information given on centrifugal force in these high school textbooks.

According to the viewpoint of physics, centrifugal force cannot exist in an inertial frame. The concept of centrifugal force is, however, used in an inertial frame in the textbooks, even though centrifugal force is not a real force but a pseudo force. The concept of centrifugal force is also used to explain physical phenomena.

The differences between an inertial frame and a noninertial frame is presented in a chapter on Coriolis' force. Coriolis' force is explained as a pseudo-force observed only in a noninertial frame. Centrifugal force is also a pseudo force, but it is not presented as a pseudo force in the chapter on centrifugal force. Centrifugal force is a pseudo force in a noninertial frame but the texts does not clarify if a centrifugal force can be explained in an inertial frame or in a noninertial frame.

Although there are varied concepts of centrifugal force among the sciences, centrifugal force in the circular motion must be described as a pseudo force in equilibrium of centripetal force in high school Earth Science II texts when you observe centripetal force in a noninertial frame just as Coriolis' force is described.