

진자의 등시성 확인 실험을 위한 사이클로이드 진자의 활용 방안 연구*

김지연 · 최호명**
(경북대학교)

Study on the cycloidal pendulum as a method to test the isochronism of a pendulum

Ji-Yeon Kim · Ho-Meoyng Choi
(Kyungpook National University)

(Abstract)

We investigated 8th grade science textbooks and their instructor's manuals treating the ideal condition for isochronism of a simple pendulum. The isochronism, i.e. the period is independent of amplitude, is satisfied only if the amplitude is very small. This is so called "ideal condition" for isochronism of a simple pendulum. Most textbooks and instructor's manuals are found not to state this ideal condition properly, which often leads to the deviation between experimental data and theoretical calculation. This difference between theoretical and experimental results makes students to create a sense of alienation from the real world and eventually keeps them away from physics. We thus study the cycloidal pendulum as an alternative method to test the isochronism regardless of amplitude and discuss the practical utility of it in class.

Key words: simple pendulum, cycloidal pendulum, isochronism, ideal condition

I. 서론

인간은 자연에 대한 탐구 과정에서 하이젠베르크의 불확정성 원리와 인간 감각의 한계로 인해 여러 가지 한계를 가지게 된다. 또한, 인간은 외부 자연세계의 복잡성 때문에 자연으로부터 정보를 수집하고 처

리하는 데에도 한계를 가지게 된다. 과학자들은 이러한 한계를 극복하기 위해 자신이 연구하고자 하는 상황에 대해 중요한 것과 중요하지 않은 것을 구별하여 본질적인 측면에서 제거될 수 있다고 생각되는 것을 무시하는 이상화라는 창의적인 방법을 고안하였다(박종원 외, 1998a).

* 이 논문은 2008 경북대학교 과학교육연구소의 지원을 받아 수행된 연구임.

** 교신저자 최호명(homyoung@knu.ac.kr)

이상화를 처음으로 도입한 이는 갈릴레오이다. 그는 복잡한 실제 세계에서 일어나는 상황들을 이상조건을 이용하여 단순화시켜 이론적 법칙이 쉽게 유도될 수 있도록 하였다(Matthews, 1994). 이상조건이란 지구의 표면이 평편하다고 하거나, 구슬이 레일을 굴러 내려갈 때 저항이 없다는 식의 이상적인 가정을 뜻한다. 물리학에서 이상화라는 것은 실용적인 측면에서는 매우 유용한 것이지만, 그것 자체가 실제 세계에 대한 진실이라고 말할 수는 없다(McMullin, 1985).

이상화는 학생들의 물리학습에도 여러 가지 측면에서 영향을 준다. 이상조건에 대한 기본적인 이해가 부족한 학생들은 그와 관련된 물리현상을 이해하는데 어려움을 겪게 되고, 물리 문제 해결 상황에서도 어려움을 겪게 된다. 뿐만 아니라 이런 학생들은 물리적 상황과 실제 현상 간의 괴리를 해결하지 못하고, 과학적인 지식과 일상생활에서 얻는 지식을 서로 분리해서 갖고 있을 수 있다(박종원 외, 1998a).

현재 7차 과학과 교육과정에서는 탐구 활동을 강조하고 있고, 교과서 내용의 구성에 있어서도 많은 실험들이 제시되어 있다. 제한된 시간에 많은 실험들을 효과적으로 수업하기 위해서는 실험과정에서 요구되는 다양한 실험 조건들이 만족되어야 한다. 실제 실험에서 이론적 예측과 실험결과가 다르게 나오는 경우, 실험결과를 해석함에 있어 실험에 포함된 이상조건에 대한 이해가 중요한 역할을 한다. 학생들은 기본적으로

학생의 선개념과 제시된 실험 결과와의 상호작용을 통해 실험 결과를 해석한다. 즉, 실험 결과의 해석에 있어서 실험자의 기대와 선행 경험 또는 배경 지식들이 영향을 미칠 수 있다는 것이다(전영신, 2004).

송진웅(1997)은 최근 여러 국내의 연구 결과에서 각급 학교 학생들이 극히 기본적인 물리 개념에 대해서도 매우 낮은 이해 수준을 보이며, 물리 학습이 이에 대한 학습 효과를 거의 보이지 않는다는 심각한 사실을 보이는 중요한 이유 중의 한 가지로 물리적 상황에서 이상조건에 부정확한 이해를 들었다. 현재 학교 실험실 상황을 돌아보면 과학교과서의 여러 실험 중 원리나 이론, 법칙을 확인하는 실험에서 고려해야 할 중요한 이상조건에 대한 인식 없이 이루어지는 실험이 많다. 이로 인해 학생들이 이론적 기대에 어긋나는 실험 결과를 얻게 되었을 때 학생은 물론 교사도 당황하게 되는 것이다. 박종원, 정병훈, 권성기, 송진웅(1999)의 연구에 의하면 실험에 포함된 이상조건에 대한 교사들의 인식 중 교사의 대부분(93%)은 이상조건을 실험에서 완벽하게 만족시킬 수 없으므로 이론적 설명과 실제 실험과는 불일치가 있을 수밖에 없다고 답하였다. 학교에서 실험을 할 때 44%의 교사들은 이상조건이 잘 만족되도록 유념하는 반면, 41%의 교사들은 이상조건에 별로 신경을 쓰지 않는다고 하였다. 한편, 학교 실험 지도에서 이상조건에 대한 지도를 포함시킬지의 여부에 대해서는 81%의 대부분 교사가 필요성이 있다고 응

답하였다. 이를 정리해보면 교사들은 실험을 할 때 이상조건의 사용은 어쩔 수 없이 필요하다고 생각하고 있었고, 실험 지도에 이상조건에 대한 지도를 포함시킬 필요성을 느끼고 있었다.

그러나 실제 세계에서 실험을 할 때 모든 이상조건을 만족시킬 수는 없으므로 해당 실험의 결과에 중요한 영향을 줄 수 있는 이상조건을 최대한 만족시킬 수 있도록 노력할 수밖에 없다. ‘단진자의 등시성’을 확인하는 실험도 마찬가지다. 보통 학생들은 ‘단진자의 주기는 실의 길이에만 영향을 받고 추의 질량이나 진폭에는 관계가 없다’라는 명제를 교육받기 때문에 이에 대한 의심 없이 진자의 등시성을 확인하기 위한 실험을 하게 된다. 그러나 실제 단진자의 주기는 진폭이 작을 때만 진폭에 관계가 없기 때문에 교사가 실험의 편리성을 위하거나 이상조건에 별로 신경을 쓰지 않고 과도하게 진폭을 크게 잡아서 실험을 할 경우 단진자의 등시성과는 어긋나는 실험 결과를 얻기가 쉽다. 학생들이 이렇게 물리 지식에 어긋나는 결과를 얻게 되는 실험을 반복적으로 경험하다보면 물리에 대한 흥미를 잃게 될 위험이 있다.

본 연구에서는 이에 대한 대안으로 사이클로이드를 활용할 것을 제안한다. 사이클로이드는 갈릴레이가 발견한 곡선으로 ‘최단 강하성’과 ‘등시성’을 특성으로 갖고 있다. 특히 17세기 후반에서 18세기에 걸쳐 수많은 과학자들이 이 사이클로이드를 연구하고 격렬하게 토론했을 만큼 매력적인

주제이고, 지금도 많은 수학·과학 체험전에서는 사이클로이드를 만들어 전시함으로써 학생들에게 많은 이목을 끌고 있다. 사이클로이드 진자는 단진자와는 달리 진폭의 크기와는 관계없이 항상 등시성을 만족한다. 이는 아직 형식적 조작기에 들어가지 못하고 구체적 조작기에 머물러 있는 초등학생이나 중학생에게 이상조건을 사용하지 않고도 진자의 등시성을 이해할 수 있는 실험을 제공할 수 있게 하여 원리를 더 잘 이해할 수 있게 해 줄 것이고 물리개념이 현실 속에 그대로 적용될 수 있다는 인식을 갖게 하여 과학에 대한 태도도 긍정적으로 바뀌게 할 수 있을 것이다. 또, 사이클로이드가 갖고 있는 특성 중 ‘최단 강하성’은 두 점 사이를 이동하는 데 걸리는 시간이 최소가 되려면 항상 최단거리를 택해야 한다는 학생들의 오개념을 바로잡을 수 있는 좋은 예가 될 수 있을 것이다.

따라서, 본 연구에서는 8학년 과학 ‘I. 여러 가지 운동’에서 속력과 방향이 변하는 운동의 예로 나오는 단진자 운동의 이상조건에 대한 언급이 있는지 교과서와 교사용 지도서의 내용을 분석해 보고, 학생들이 느끼는 실제 세계와 물리 세계 사이에 괴리를 최소화 할 수 있도록 ‘진폭이 매우 작을 때’라는 이상조건이 필요 없이 진자의 등시성을 만족하는 ‘사이클로이드’에 대해 조사해 보고자 한다.

Ⅱ. 이론적 배경

본 연구에서 가장 핵심이 되는 이상화가 물리학습에 주는 시사점과 사이클로이드의 특성에 대해 살펴보기로 한다.

1. 이상화가 물리학습에 주는 시사점

이상조건에 대한 이해는 물리 세계에 대한 이해와 밀접하게 연결되어 있다. 물리학습에서 이상조건이 사용되는 경우는 이론적 설명과정에서 사용되는 경우나 실험에서 사용되는 경우로 나눌 수가 있다.

이론적 설명과정에서 사용되는 경우에는 물리용어나 개념정의에 이상조건이 포함된 경우나 법칙이나 공식의 유도과정에 이상조건이 포함된 경우, 현상의 설명이나 문제 해결과정에 이상조건이 포함된 경우이다. 이 중 법칙이나 공식의 유도과정에 이상조건이 포함된 경우에서 학생들은 기계적으로 유도과정을 암기하거나 당연하듯이 받아들일 뿐, 그 속에 포함된 이상조건들의 역할을 알지 못하는 경우가 많다. 심지어 이상조건이 사용되었다는 것조차 모르는 경우가 많이 있다.

Schecker(1992)는 8학년 254명의 학생들이 이상조건의 사용을 어떻게 받아들이고 있는가를 연구하였다. 그는 아래의 진술문과 같은 방법이 유용한지 아닌지에 대한 의견을 조사하였다.

“물리수업에는 종종 실제 실험으로는 분명히 이루어질 수 없는 가정이나 사고 실험

들이 있다. 예를 들면, 공기 저항이나 마찰력을 완전히 배제한다거나, 무한히 계속되는 직선 운동을 가정하는 경우가 그렇다.”

조사 결과, 11%의 학생은 존재하지도 않는 이상조건의 사용을 거부하였다. 55%의 학생은 물리학이 어차피 실재를 다루고 있는 것이 아니기 때문에 이상화의 방법이 유용하다고 답했고, 25%의 학생만이 과학에서의 이상화 기법의 의미를 어느 정도 이해하고 있었다: “이상화된 상황은 만지고 볼 수 있는 실제들을 구성하는 필요한 정신적 도구이다.”

이런 학생들의 반응으로부터 두 가지의 극단적인 학생 관점을 가정해 볼 수 있다.

첫째, 학생들이 물리학에서 다루는 내용이 항상 실제 세계와 동일하며 물리 세계에서 예측된 현상은 실제 세계와 동일하여야 하므로 물리 세계에서 예측된 현상은 실제 세계에서 그대로 관찰될 수 있어야 한다고 생각한다는 것이다. 이런 관점을 갖고 있는 학생은 실험 결과 이론적으로 예측된 값과 오차가 있는 값이나 다른 값을 얻게 되면 많은 경우 실험 방법이 미숙했거나, 실험 장비가 정밀하지 못했기 때문이라고 생각한다. 이런 학생들에게 ‘참’인 것은 이상화된 물리세계이며, 실제 세계에서 측정된 값은 불완전하거나 오히려 ‘거짓’이 되는 셈이다.

둘째, 첫째와 반대로 학생들이 물리 자체가 현실과는 유리된 이론적이고 가상의 세계라고 생각하는 경우이다. 이런 관점을 가

진 학생들은 물리학에서 사용되는 이상조건이 참이 아니라는 사실을 알면서도 이상조건을 쉽게 인정하게 된다. 그러나 그것을 물리 세계와 실제 세계와의 완전한 괴리로 이해하고 있다면 물리학을 배울 가치나 실제 세계를 설명하기 위해 물리학을 사용할 근거가 없어지게 된다.

이런 두 극단적인 입장을 가진 학생에게 중요한 것은 이상화된 물리세계에서 어떠한 이상조건을 사용하였으며, 그 이상조건이 실제 세계에서 얼마나 가까이 또는 멀리 떨어져 있는가를 인식하는 것이다. 즉, 이상조건이 적용될 수 있는 범위와 한계에 대한 인식이 중요하다.

2. 사이클로이드의 정의와 특성

일직선 위를 미끄러지지 않고 굴러가는 바퀴 상에 고정된 한 점이 그리는 궤적을 보면, 그 점은 회전을 거듭할 때마다 일정한 모양의 곡선을 Fig.1과 같이 그리게 된다. 이 궤적을 사이클로이드(cycloid)라 부르며 1599년 갈릴레오(Galileo)에 의해 명명되었다.

Fig.1과 같이 반지름이 a 인 바퀴상의 한

점 P 가 만족하는 사이클로이드의 (x, y) 좌표는 각각

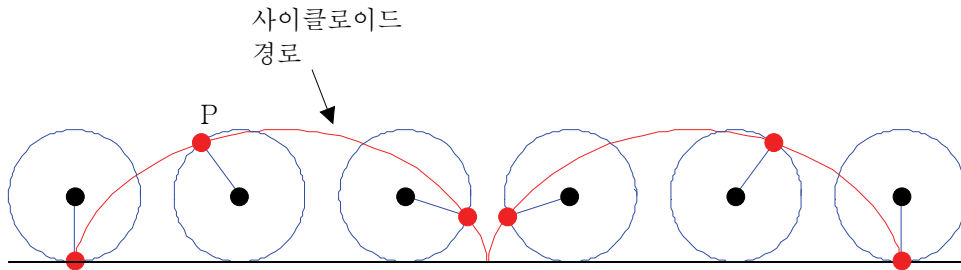
$$\begin{aligned} x &= a(\theta - \sin \theta) \\ y &= a(1 - \cos \theta) \end{aligned} \tag{1}$$

이다. 여기서 θ 는 매개 변수이고 $a\theta$ 는 구르는 바퀴 중심의 x 축 좌표이다. θ 값이 2π 의 정수배에 따라 바퀴 상의 한 점 P 는 최고점(혹은 최저점)에 도달하는 과정을 반복한다. 사이클로이드의 가장 큰 특징인 최단 강하성과 등시성에 대해 간략히 설명하면 다음과 같다.

1) 최단 강하성

최단 강하선은 “Brachistochrone curve”라고 하며 “Brachistochrone”은 그리스어인 ‘brachistos’와 ‘chronos’의 합성어로서 ‘brachistos’는 가장 짧음을 의미하고 ‘chronos’는 시간을 의미한다. 말 그대로 풀이하면 가장 짧은 시간을 갖는 곡선이라는 뜻이다.

1638년 갈릴레이는 자신의 유명한 저서 「Discourse on Two New Science」에서 임의의 두 점 사이를 이동할 때의 최단 강하선은 직선이라고 주장했다. 후에 그는 두



<Fig. 1> 바퀴상의 한 점 P가 그리는 사이클로이드 경로

점을 잇는 원호 위의 점을 꼭지점으로 삼아 두 선을 연결하면 직선보다 시간이 더 짧게 걸린다는 사실을 발견하였다. 이 사실을 발견한 그는 기존의 최단 강하선이 직선이라는 주장을 반복하여 최단 강하선은 두 점을 잇는 원호라고 주장하였다. 그러나 실제로 최단 강하선은 직선도 아니고 원호도 아니다. 1696년 장 베르누이가 「Acta Eroditorum」이라는 과학 잡지에 낸 최단 강하선 문제는 당대의 유명한 과학자였던 베르누이형제, 라이프니츠, 로피탈, 뉴턴에 의해 해결되었으며, 그 결과 두 점 사이의 최단거리를 갖는 최단 강하선은 직선이 아니라 사이클로이드 곡선이라는 사실이 밝혀졌다. 사이클로이드의 최단 강하성을 확인하기 위해 사이클로이드 곡선 경로와 직선 경로의 강하시간을 비교하는 실험 장치도 17세기에 이미 제작되었다.

이처럼 직선, 사이클로이드, 원을 따라 공을 굴렸을 경우 사이클로이드 곡선 경로에서 시간이 가장 짧게 걸리는 이유는 최단거리를 나타내어 가장 시간이 적게 걸릴 것 같은 직선의 경우보다 각 지점에서 중력가속도의 감소가 작기 때문이다. 그렇기에 사이클로이드 위에서는 다른 이동경로에 비해 큰 가속도에 의해 보다 빨리 속도가 증가하므로 사이클로이드가 거리는 더 길지만 더 빠른 시간에 도착하게 된다. 사이클로이드 곡선은 빠른 시간 안에 강하하여 먹이 사냥을 하는 독수리의 먹이 포획 곡선이나 비가 잘 흘러내릴 수 있는 구조를 가진 전통 한옥 기와나 초가지붕, 물고기의 비늘에서도 발견할 수 있다.

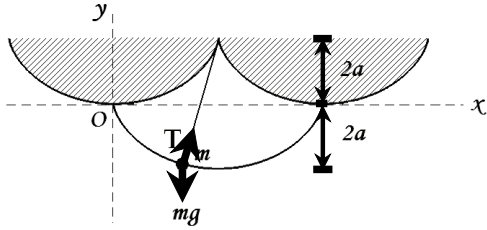
2) 동시성

동시곡선은 “Tautochrone curve”라고 하며 “Tautochrone”은 그리스어 ‘tauto’와 ‘chronos’의 합성어으로써 ‘tauto’는 같음을 의미하여 항상 일정한 시간을 갖는 곡선을 말한다. 이 동시곡선은 사이클로이드 곡선으로, 호이겐스에 의해 1673년 그의 저서 「Horologium oscillatorium」에서 처음 발표되었다. Fig. 2는 사이클로이드 위에 높이가 다른 두 지점 P와 Q에 놓인 물체를 나타낸 것이다.



<Fig. 2> 사이클로이드 상에 놓인 두 물체의 운동

두 물체를 동시에 가만히 놓으면 두 물체는 높이에 상관없이 바닥에 동시에 도착한다. 즉, 사이클로이드 곡선 상에 놓인 물체의 진동 주기는 곡선상의 위치에 무관하며 이런 이유로 해서 사이클로이드를 동시곡선이라 부른다. 이러한 동시곡선의 특징을 이용하여 사이클로이드 진자를 만들 수 있다. Fig. 3은 반지름이 a 인 원의 한 점이 그리는 사이클로이드 곡선의 접점(뽕죽한 부분)에 실의 한 쪽 끝을 고정시키고 다른 쪽 끝에 질량 m 인 물체를 매달아 만든 사이클로이드 진자를 나타낸 것이다(고재걸, 2002: 544).



<Fig. 3> 사이클로이드 진자

이 진자의 궤적 또한 다음과 같은 사이클로이드 경로를 따른다.

$$\begin{aligned} x &= a(\phi - \sin \phi) \\ y &= a(\cos \phi - 1) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 진자의 길이는 $4a$ 이고, ϕ 는 사이클로이드를 만드는 원의 회전각이다. 사이클로이드 진자의 한 주기는 물체가 원점 $(x, y) = (0, 0)$ 에서 최하단점 $(x, y) = (a\pi, -2a)$ 까지 내려오는데 걸리는 시간을 t_1 이라 하면 사이클로이드 진자의 주기는

$$\tau = 4t_1 = 4\pi \sqrt{\frac{a}{g}} \quad (3)$$

이고 진폭에 상관없이 일정한 값을 갖는다 (하명현 외, 2001). 사이클로이드 진자는 진자의 등시성을 증명하기 위해 진폭이 매우 작아야한다는 이상조건이 필요 없으므로 19세기까지만 해도 과학교구로 활발하게 제작되어 진자의 실험에 사용되었다.

Ⅲ. 연구 대상 및 방법

1. 8학년 과학 교과서와 교사용 지도서의 '단진자의 운동'부분 분석

본 연구에서는 제 7차 교육과정에서 사용되고 있는 김인정 교과서 중 8종의 8학년 '과학 2' 교과서를 선정하여 분석하였다. 또, 같은 출판사에서 출판된 8종의 8학년 '과학 2' 교사용 지도서를 선정하여 분석하였다. 권종미, 정완호, 김영신(2001)의 연구에 따르면 83.1%의 교사가 교사용 지도서는 교육 과정의 정상적 운영을 위해서 필

<Table 1> 연구에 사용된 8종의 8학년 '과학 2' 교과서와 교사용 지도서

기호	저자	출판사
A	김찬중 외 11명	(주) 도서출판 디딤돌
B	김정률 외 9명	(주) 블랙박스
C	정완호 외 9명	(주) 교학사
D	최돈형 외 11명	도서출판 대일도서
E	박봉상 외 10명	동화사
F	강만식 외 11명	(주) 교학사
G	소현수 외 10명	(주) 두산
H	이성목 외 11명	(주) 금성출판사

요하다고 답했고, 63.4%의 교사가 교사용 지도서를 자주 활용하고 있다고 답했으므로 교사용 지도서를 분석하는 것도 수업상황에서 실제로 학생에게 제시되는 개념을 알아보는 데 필요할 것이다. 연구에 사용된 교과서와 교사용 지도서는 Table 1과 같고, 이를 기호A, B, C 등으로 나타내었다.

교과서와 교사용 지도서를 분석할 때는 진자의 등시성에 대한 언급 여부, 진자의 등시성 확인 실험 유무, 진자 운동 그림이나 사진의 적절성 등을 분석하였다.

2. 단진자와 사이클로이드 진자의 등시성 확인 실험

단진자의 등시성 확인 실험과 사이클로이드의 등시성 확인 실험을 실시하여 초기 각도에 따라, 즉 진폭에 따라 진자의 주기 값을 비교해 보았다. 각 교과서에서 제시한 실험조건이 모두 다르므로 이 중 어떤 실험이 가장 효과적으로 진자의 등시성을 확인할 수 있는지 알아보았다.

1) 단진자의 등시성 확인 실험

진자의 등시성을 확인하는 실험에서 변인은 진자의 길이, 추의 질량, 진폭으로 총 3개이다. Table 1의 8종의 교과서 중 분석 결과 가장 분량이 많고 각 변인에 따른 가설을 세워 실험을 실시한 H 교과서와 교사용 지도서를 주로 참고하였다. 진자의 주기를 측정할 때는 진자가 10회 왕복하였을 때의 시간을 5회 측정한 다음 평균을 내서

주기를 구했다.

(1) 진자의 길이와 진자의 주기

추의 질량이 50g, 진폭이 15cm일 때, 진자의 길이를 25cm, 40cm, 50cm로 달리하였을 때의 진자의 주기를 측정했다.

(2) 추의 질량과 진자의 주기

실의 길이는 50cm, 진폭은 15cm일 때, 추의 질량을 50g과 100g으로 달리하였을 때의 진자의 주기를 측정했다.

(3) 진폭과 진자의 주기

추의 질량은 50g, 실의 길이가 50cm일 때, 진폭을 10cm, 15cm, 20cm, 25cm, 30cm, 35cm, 40cm로 달리하여 측정했다.

진자의 길이, 추의 질량은 본 연구 주제와는 직접적인 관련이 없는 실험이지만 실제 진자의 등시성 확인 실험에서 진폭의 크기를 제외한 다른 변인에 의해 주기의 차이가 발생할 수 있는지 여부에 대해 확인하기 위한 실험도 실시해보았다.

2) 사이클로이드 진자의 등시성 확인 실험

간단한 제작 과정을 거쳐 사이클로이드 진자를 제작했다. 이 사이클로이드 진자는 α 값을 10cm로 두어 제작하고, 이에 맞추어 실의 길이를 40cm로 측정했다. 추의 질량이 50g일 때, 진폭을 10cm, 15cm, 20cm, 25cm, 30cm로 달리하여 진자의 주기를 측정해 보았다.

또, 실의 길이가 사이클로이드 진자의 크기와 관계없을 때 진자의 주기와 진폭과의

관계를 알아보기 위해 실의 길이가 50cm일 때 진폭에 따른 진자의 주기를 위의 실험과 동일한 방법으로 측정해 보았다.

IV. 연구 결과 및 고찰

1. 8학년 과학 교과서와 교사용 지도서의 '단진자의 운동'부분 분석

8종의 교과서 모두 '단진자의 운동'을 속력과 방향이 모두 변하는 운동의 예로 언급하고 있다. 그러나 8종의 교과서에서 '단진자의 운동'에 대해 설명하기 위해 할애하는 교과서 분량은 짧게는 3줄부터 많게는 2쪽까지 다양하였다. Table 2는 단진자의 등시성 언급 및 확인 실험 여부에 대한 8종의 교과서를 분석한 것이다.

1) 진자의 등시성에 대한 언급 여부

8종의 교과서 중 5종의 교과서에서 진

자의 등시성에 대해 언급하였지만 초기각도가 작을 때, 즉 진폭이 작을 때만 진자의 등시성이 성립한다는 사실을 언급한 교과서는 B 교과서 밖에 없다는 사실을 확인할 수 있다. 따라서 진자의 등시성에 대한 이상조건을 언급한 교과서가 8종 중 1종에 불과한 점을 보면 학생들이 수업시간에 교사가 따로 이상조건에 대한 언급을 하지 않는 이상 교과서를 보고는 진자의 등시성이 초기각도가 작을 때만 성립한다는 사실을 알기 어렵다.

2) 진자의 등시성 확인 실험 포함 여부

8종의 교과서 중 4종을 제외한 나머지 4종의 교과서만 진자의 주기에 영향을 주는 요인이 무엇인지 알아보고 진자의 등시성을 확인하는 실험을 포함하고 있었다. 그 중 2종은 실의 길이, 진폭, 추의 질량에 대한 구체적인 조건을 주지 않았고, 나머지 2종은 실의 길이, 진폭, 추의 질량에 구체적

<Table 2> 단진자의 등시성에 대한 교과서 분석

기호	등시성 언급 여부	진자의 등시성 확인 실험 여부
A	○	○
B	○	○
C	○	○
D	○	×
E	×	×
F	×	×
G	×	×
H	○	○

인 값을 주어 실험하도록 하였다. 이 때 실의 길이와 진폭의 크기를 이용하여 초기각도를 계산해보면 2.9° 에서 11.5° 로 값이 작아 진자의 등시성을 만족할 수 있을 만한 실험이다. 그러나 구체적인 실험조건을 주지 않은 경우에는 교사가 적당한 조건을 제시하지 않는다면 등시성을 만족할 수 없을 만큼 큰 초기각도로 실험하여 등시성이 성립되지 않는 실험 결과를 얻을 수도 있다.

3) 진자의 운동 그림이나 사진의 적절성 여부

8종의 교과서 모두 진자의 등시성이나 진자의 등시성을 확인하는 실험의 포함 여부에 관계없이 진자의 운동에 대한 설명에 진자의 운동에 대한 다중선평사진이나 삽화를 포함하고 있었다. 이렇게 시각화된 자료는 텍스트 형태의 자료보다 학생들에게 접근하는 시간도 빠르고 학생들이 진자 운동을 인식하는데 큰 영향을 끼치게 된다. 교과서에서 제시된 진자의 등시성 확인 실험에서는 초기각도가 이상조건을 거의 만족할 만큼 작은 각들이기 때문에 학생들이 결론을 내는데 별 어려움이 없을 수 있다. 그러나 학생들이 실험하기 전에 보게 되는 교과서 내의 진자운동의 사진이나 그림을 보면 초기각도가 다소 크기는 하나 이상조건을 거의 만족하는 16° 에서부터 이상조건을 만족하지 못할 만큼 값이 큰 54° 까지 다양하다. 물론 다중선평사진은 초기각도가 이상조건을 만족할 만큼 작을 경우에 물체

의 움직임이 잘 나타나지 않아 의도적으로 초기각도를 크게 나타내었을 수도 있으나 교과서와 교사용 지도서에 삽화를 해석하는데 참고가 될 만한 유의사항이 없었고, F 교과서의 다중선평사진은 초기각도가 16° 로 이상조건에 근접하게 나타낼 수 있었던 것으로 보아 교과서 삽화에 좀 더 주의를 기울일 필요가 있을 것이다.

이렇게 등시성이 성립될 수 있도록 하는 이상조건에 어긋나는 사진이나 그림을 먼저 보고 학습한 학생들은 초기각도가 진자의 등시성에 주는 영향을 배우지 않는 한 초기각도가 클 때도 진자의 등시성이 성립한다는 오개념을 갖게 될 수 있다. 이런 경우 진자의 등시성을 확인하는 실험을 할 때, 실험 조건을 정확하게 주지 않은 상태에서 실험을 하게 된다면 학생들은 초기각도에 대한 이상조건이 만족되지 않은 실험을 실시하여 물리세계와 현실세계에 대한 괴리감을 느끼게 될 것이다. 더욱이 교과서를 분석해본 결과 8종의 교과서 중 1종을 제외한 나머지 7종은 초기각도가 작을 때만 진자의 등시성이 성립된다는 이상조건을 제시하지 않았기 때문에 학생들이 오개념을 갖게 되기 쉬울 것이다.

교사용 지도서에서는 간단하게 진자 운동의 정의 정도만 서술한 책도 있는 반면 약 3쪽에 걸쳐 자세한 실험과 실험 데이터 기록, 단진자의 주기 공식 유도 과정까지 나타낸 책도 있었다. 교사용 지도서에서 주목할 만한 것은 실험지도에 있어서 교과서에서는 거의 언급이 없었던 진폭(초기각도)

과 관련된 이상조건이 언급되어 있느냐는 것이다. 교과서에서 학생들에게 이상조건에 대한 언급이 없어도 교사들이 참고하는 교사용 지도서에서 이를 언급한다면 학생들에게 지도될 가능성이 커진다. Table 3은 단진자의 등시성 언급 및 확인 실험 여부에 대한 8종의 교사용 지도서를 분석한 것이다.

A 교사용 지도서는 진자의 등시성에 대한 설명과 진자의 등시성을 확인하는 실험의 데이터를 포함하고 있다. 참고 자료에는 진자에 작용하는 힘을 이용하여 진자의 주기를 계산하는 과정을 작성해 놓았고 이를 통해 계산한 진자의 주기 공식과 진자의 등시성을 발견하기까지의 역사가 포함되어 있다. 진자의 주기를 계산하는 과정에는 '진자의 진폭이 매우 작을 때'라는 이상조건이 포함되어 있다.

B 교사용 지도서는 A와 마찬가지로 진

자의 등시성에 대한 설명과 진자의 등시성 확인 실험, 진자의 주기 공식 유도 내용이 포함되어 있고 수업 도움 글에는 진자의 등시성을 발견한 갈릴레이에 대한 내용이 실려 있다. B에서는 진자의 등시성 확인 실험의 데이터에서 주기 측정을 3회 실시하여 평균값을 낸 점이 A와는 차이가 있었다. 실험 정리 부분에는 '진자의 주기는 추의 질량과는 관계가 없으며, 흔들리는 각도가 그다지 크지 않다면 진폭과도 관계가 없다. 그러나 진자의 길이가 길수록 진자의 주기는 커진다.'라고 정리되어 있었는데, 정확한 이상조건을 표현한 것은 아니지만 초기각도가 작아야 하는 것을 언급했다.

C 교사용 지도서는 진자의 등시성에 대해 '추의 길이가 일정하면 진폭이 크지 않을 때 추의 질량이나 진폭의 크기에 관계없이 진자의 주기는 일정하다.'라고 설명하였다. 그러나 진폭이 크지 않다는 것은 개인에 따라 상대적인 개념이므로 진자의 이

<Table 3> 단진자의 등시성에 대한 교사용 지도서 분석

기호	등시성 언급 여부	진자의 등시성 확인 실험 여부
A	○	○
B	○	○
C	○	○
D	○	×
E	×	×
F	○	×
G	○	○
H	○	○

상조건에 대해 인식하지 못하는 교사의 경우에는 학생들에게 효과적인 교육이 이루어지지 못할 가능성이 크다. 진자의 등시성 확인 실험도 실려 있지만 구체적인 데이터는 포함되어 있지 않다.

D 교사용 지도서는 “진자의 운동에서 주기는 물체의 무게와는 관계가 없는데, 이러한 특성을 ‘진자의 등시성’이라고 한다.”라는 간단한 진자의 등시성에 대한 설명만 포함되어 있다.

E 교사용 지도서는 간단한 진자의 운동에 대해 설명하는 내용을 포함되어 있으나 진자의 등시성에 대한 내용은 포함되어 있지 않다.

F 교사용 지도서는 E와 마찬가지로 간단한 진자의 운동에 대한 설명이 포함되어 있고, 도움말에는 진자의 등시성에 대한 언급이 있다.

G 교사용 지도서는 A, B와 마찬가지로 진자의 등시성에 대한 설명, 진자의 등시성의 발견 역사, 진자의 등시성 확인 실험 등이 모두 실려 있다. 그러나 실험 데이터는 나와 있지 않고 실험을 할 때 사용할 수 있도록 실험 설계 표가 제시되어 있다. 이때 초기각도가 약 17.5° 정도로 큰 편이지만 이상조건에서 큰 차이는 나지 않는다.

특히 G 교과서에서는 주의사항으로 학생들은 오차에 대한 지식이 부족하므로 교사가 실험 전에 오차와 오차의 범위에 대하여 간략하게 설명하기를 권한다. 8학년 과정에서는 정량적으로 정확한 값을 얻기보다는 정성적으로 결과를 해석하도록 유도

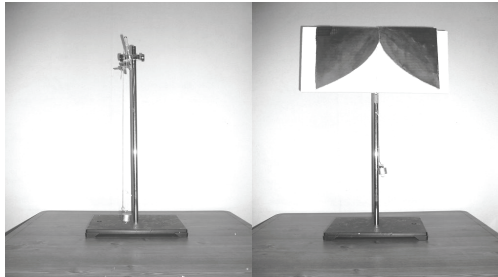
하는 것이 중요하므로 교사가 유효숫자의 개수를 적절히 조절하여 학생들이 결과를 해석하게 하기를 권하는 것이다. 그러나 그 예로 실험에서 주기가 2.0과 1.9가 나왔을 때 이를 다르게 해석하는 학생들이 잘못된 것이라고 하였는데, 학생들이 보통 사용하는 초시계가 소수 둘째자리나 셋째자리까지 표현되는 것을 생각해 보면 소수 첫째자리가 다른 값은 엄밀히 다른 값이며, 이를 무시하는 것은 탐구과정의 정밀성을 무시하는 것이라고 볼 수 있다. 또, 실험의 탐구과정에 대한 평가의 예시에서 결과 해석 1에서 ‘실험 결과를 해석하여 결론을 내렸으나 옳지 않은 경우’에 3점 만점에 1점을 감점하는 것으로 기준을 잡았는데 ‘진폭이 짧을수록 주기도 작다’라는 표현을 예로 들어서 엄밀하게 진폭의 값이 이상조건에서 벗어날 경우에는 옳은 명제를 틀린 명제로 나타내었다.

F 교사용 지도서는 진자의 등시성에 대한 설명과 진자의 주기를 구하는 공식의 유도 과정을 나타냈고, 진자의 등시성을 확인하는 실험에 대해 데이터를 포함하고 있다.

정리해 보면 교과서와 달리 교사용 지도서에는 1종을 제외한 나머지 7종에서 진자의 등시성에 대한 언급이 나와 있고, 5종의 교사용 지도서에 진자의 등시성 확인 실험이 실려 있다. 따라서 교과서에는 진자의 등시성에 대한 언급이 없거나 진자의 등시성을 확인하는 실험이 없더라도 실제 수업 상황에서는 학생들에게 이에 대한 내용을 교사가 제시할 수도 있다는 것이다.

2. 단진자와 사이클로이드 진자의 등시성 확인 실험 결과

실험에 사용된 실험 장치는 Fig. 4와 같이 보통 학생들이 학교에서 실험을 할 때 사용하는 스탠드를 이용하였다. 실의 질량은 최소 측정치(0.1g)에 도달하지 못할 정도로 가벼워서 무시할 수 있었다. 주기를 측정하는 초시계는 1/1000초까지 측정이 가능한 것을 사용하였다.

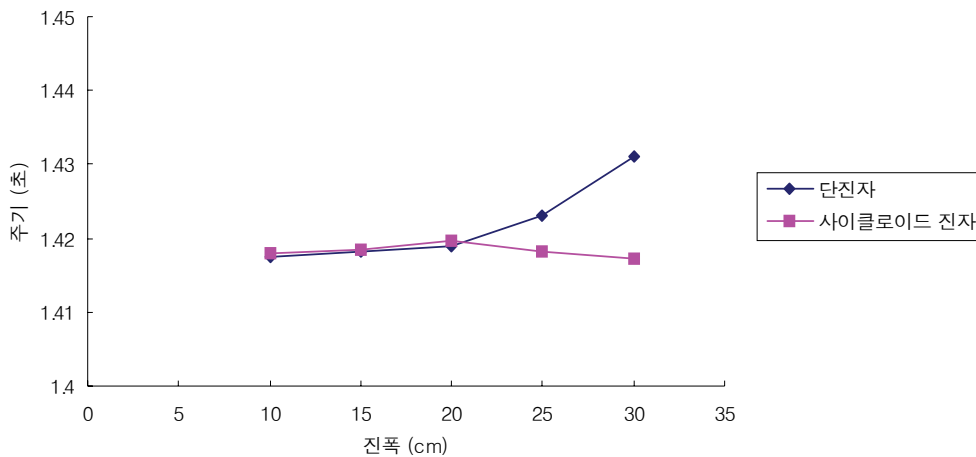


<Fig. 4> 단진자(왼쪽)와 사이클로이드 진자(오른쪽)

실제 실험에서는 진자의 길이, 추의 질량, 진폭을 달리하며 진자의 주기를 측정하였다. 위의 실험결과들 중 본 연구 주제와 직접적인 관련이 있는 진폭의 변화에 따른 주기 측정 실험 결과에 대해 논의해 보고자 한다.

추의 질량이 50g이고, 진자의 길이가 50cm일 때 진폭의 변화에 따른 단진자와 사이클로이드 진자의 주기 측정 실험 결과는 Fig. 5와 같다.

주어진 조건에서 진자의 등시성이 성립된다고 가정할 때, 주기의 이론값은 1.419 초이다. Fig.5에서 보듯 진폭이 20cm일 때까지는 사이클로이드 진자와 단진자 주기의 차이가 거의 나지 않지만, 25cm부터는 그 차이가 벌어지기 시작한다. 사이클로이드 진자의 주기는 진폭이 증가함에 따라 약간씩의 변동만 있을 뿐 뚜렷하게 증가



<Fig. 5> 진폭에 따른 단진자와 사이클로이드 진자의 주기 비교

하지는 않지만, 단진자의 주기는 점차 증가하는 것을 알 수 있다.

실험 결과를 통해 알 수 있는 사실은 다음과 같다.

첫째, 진자를 이용하여 주기를 측정하는 실험에서 진자의 길이, 추의 질량의 변화에 따른 주기의 변화를 측정한 결과 이론값과 실험값의 차이는 오차가 1% 내외로 매우 작았다. 이 결과로 미루어 볼 때, 진자의 주기 측정 실험에서는 공기의 저항, 시간을 측정할 때의 반응시간, 실의 질량, 실의 길이의 부정확성에 의한 오차는 그리 크지 않음을 알 수 있다.

둘째, 단진자를 이용한 주기 측정 실험에서 진폭과 주기와의 관계를 확인할 때, 무시할 수 없는 오차가 발생한다. 이 오차는 진폭의 값이 증가할수록 점차 커지는 것을 알 수 있었다. 교사가 실험 과정을 제시하는 실험에서는 진자의 등시성이 성립할 만큼 작은 값을 주어 실험하게 할 수 있지만, 학생들이 실험 설계까지 하게 된다면 진폭이 작을 때보다는 적당히 클 때 측정하기가 더 쉬우므로 진자의 등시성이 성립되지 않는 실험 결과를 얻을 수 있게 된다. 이때 이론값과 비교했을 때 오차가 나는 결과를 얻었음에도 불구하고 이 결과를 이용해 진자의 등시성이 성립된다는 결론을 낼 경우 학생들은 실제세계와 물리세계 사이에서 괴리감을 느끼게 되고, 물리는 실제 생활에는 쓸모없는 학문이라는 인식을 하게 되거나 물리과학 자체에 흥미를 잃을 수도 있다.

셋째, 간단한 장치만을 이용하여 사이클로이드 진자를 만들어 진자의 등시성 실험을 한 결과 진폭이 증가해도 주기가 증가하지 않고 거의 일정한 값을 가졌다. 특히, 지지대가 되는 사이클로이드 진자의 크기와 관계없이 실의 길이를 달리하여 진자의 주기 측정 실험을 실시해도 단진자 실험의 결과보다 더 이론값과 가까운 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 학생들에게 굳이 사이클로이드의 특성을 설명하지 않아도 진자 실험에서 간단한 사이클로이드 진자를 이용하여 실험을 하게 되면 단진자 실험에서 얻게 되는 결과보다 더 이론값에 가까운 값을 얻을 수 있게 될 것이다.

V. 결론 및 제언

본 연구는 이상조건으로 인해 실험 결과가 이론값과 다르게 나올 경우 학생들이 물리세계와 실제 세계에 대한 괴리감을 느끼고 이로 인해 물리라는 학문을 어려워하고 멀리 하려 한다는 기존 연구 결과에 기반을 두고 8학년 과학 내용에 포함된 진자의 등시성에 대해 교과서와 교사용 지도서를 분석해서 과학 교과서에서 이상조건을 다루고 있는지에 대해 조사해보았다. 또, 초기각도가 작을 때만 성립한다는 이상조건을 가진 단진자의 등시성 확인 실험에 대한 대안으로 사이클로이드 진자의 등시성 실험에 대한 이점을 조사

해보았다.

첫째, 8종의 8학년 용 과학 교과서와 교사용 지도서 모두 진자의 등시성이나 이를 확인하는 실험을 포함하고 있는 것은 아니지만 대부분의 교과서는 이를 포함하고 있었다. 그러나 단진자의 등시성이 성립될 수 있는 이상조건을 언급한 책은 교과서 1종, 교사용 지도서 3종에 불과했다. 또한 이 책들도 이상조건에 대해 애매한 표현인 ‘진폭이 크지 않을 때’, ‘진폭이 작을 때’라는 말을 사용하여 구체적인 값을 제시하지 않고 주관적으로 해석이 가능한 말로 표현하였다. 특히, 교과서에 실려 있는 단진자 운동의 다중섭광사진이나 삽화는 초기 각도가 최대 54° 까지 표현되어 있어 등시성이 성립하기 위한 이상조건에 어긋나는 것들이 많았고 이는 은연중에 학생들에게 진자의 등시성은 초기각도가 커도 성립할 것이라는 오개념을 갖게 할 가능성이 컸다.

둘째, 교과서에 실려 있는 단진자의 등시성 확인 실험을 실시하고 같은 조건에서 사이클로이드 진자의 등시성 확인 실험을 실시하여 실험값을 비교해 보았을 때 단진자는 진자의 길이와 추의 질량에 따른 주기를 확인하는 실험에서는 이론값과 큰 오차를 보이지 않았지만 진폭의 변화에 따른 주기를 확인하는 실험에서는 진폭이 커짐에 따라 주기가 길어지는 결과를 나타내서 진자의 등시성을 확인하는 실험으로 적당하지 않은 면을 갖고 있었다. 한편, 사이클로이드 진자는 진폭이 커

짐에도 주기가 거의 일정하게 유지되었고 단진자로 실험할 때보다 이론값에 더 근접한 실험값을 얻을 수 있었다.

본 연구를 정리해 보면 사이클로이드는 진자의 등시성 확인 실험에서 진폭과 관련된 이상조건이 필요 없으므로 단진자의 등시성 확인 실험의 대안이 될 수 있다.

끝으로, 본 연구를 수행하면서 곡선을 따라 움직이는 물체의 운동에 관한 설문도 함께 실시하였다. 이 설문은 2007년 9월 대구시 모 중학교 2학년 2개 반 학생(남학생 46명, 여학생 35명)을 대상으로 실시하였다(김지연, 2008). 설문 내용 중 “두 점 사이를 잇는 직선과 곡선 경로 중 빠른 시간 안에 내려올 수 있는 경로는 어떤 것일까?”에 대한 질문에 약 59.3%의 학생들이 직선 경로가 더 빠를 것이라고 응답했다. 그 중 45.8%의 학생은 직선 경로의 거리가 짧기 때문에 더 빠를 것이라고 답했는데, 이때 학생들은 두 점 사이를 잇는 경로의 기울기를 파악하지 못하고 있었다. 이 결과는 학생들에게 서로 다른 경로에 따른 속력의 변화에 대한 학습과 속력, 걸린 시간 및 이동 거리에 대한 학습이 제대로 이루어지지 못했음을 알 수 있다. 사이클로이드는 두 점 사이를 이동하는 물체의 운동에서 최단 강하시간을 갖는 경로는 직선이라고 생각하는 학생들의 오개념을 과학적 개념으로 바꾸기 위해 활용할 수 있지만, 8학년 학생들에게 수학적 공식을 통해 사이클로이드의 최단 강하성을 설명하는 것은 효과적이지 못하

다. 최단 강하성에 대한 오개념을 8학년 학생들의 지적 수준에 맞게 효과적으로 과학적 개념으로 바꾸기 위한 대안으로 여러 과학자들이 최단강하선이 사이클로이드임을 증명해 내는 역사를 이용한 과학사 수업(이현선, 유정문, 2004; 강석진, 김영희, 노태희, 2005; 박길순, 2005; Segueira, Leite, 1991)을 하거나 직접 사이클로이드 곡선을 제작하여 직선 경로와 강하시간을 비교하는 실험을 해보는 것이 좋은 방법이 될 수 있을 것이다.

〈참고 문헌〉

- 강만식 외(2001a), 「중학교 2학년 과학」, 서울: (주)교학사
- 강만식 외(2001b), 「중학교 2학년 과학 교사용 지도서」, 서울: (주)교학사
- 고재걸(2002), 「역학」, 서울: 청문각
- 김정률 외(2001a), 「중학교 2학년 과학」, 서울: (주)블랙박스
- 김정률 외(2001b), 「중학교 2학년 과학 교사용 지도서」, 서울: (주)블랙박스
- 김찬중 외(2001a), 「중학교 2학년 과학」, 서울: (주)도서출판 디딤돌
- 김찬중 외(2001b), 「중학교 2학년 과학 교사용 지도서」, 서울: (주)도서출판 디딤돌
- 박봉상 외(2001a), 「중학교 2학년 과학」, 서울: 동화사
- 박봉상 외(2001b), 「중학교 2학년 과학 교사용 지도서」, 서울: 동화사
- 소현수 외(2001a), 「중학교 2학년 과학」, 서울: (주)두산
- 소현수 외(2001b), 「중학교 2학년 과학 교사용 지도서」, 서울: (주)두산
- 이성묵 외(2001a), 「중학교 2학년 과학」, 서울: (주)금성출판사
- 이성묵 외(2001b), 「중학교 2학년 과학 교사용 지도서」, 서울: (주)금성출판사
- 정완호 외(2001a), 「중학교 2학년 과학」, 서울: (주)교학사
- 정완호 외(2001b), 「중학교 2학년 과학 교사용 지도서」, 서울: (주)교학사
- 최돈형 외(2001a), 「중학교 2학년 과학」, 서울: 도서출판 대일도서
- 최돈형 외(2001b), 「중학교 2학년 과학 교사용 지도서」, 서울: 도서출판 대일도서
- 강석진, 김영희, 노태희(2005), “과학사를 이용한 소집단 토론 수업이 학생들의 과학의 본성에 대한 이해에 미치는 영향”, 한국과학교육학회지, 제 24권 제 5호, 996-1007.
- 권종미, 정완호, 김영신(2001), “과학과 교사용 지도서에 대한 교사의 인식과 개선 방향”, 초등과학교육, 제 20권 제 1호, 75-90.
- 김지연(2008), “사이클로이드 곡선을 따라 움직이는 물체의 운동 분석”, 경북대학교 교육대학원 석사논문.
- 박길순(2005), “과학사를 도입한 수업 후 고등학생들의 열과 온도 개념의 변화

- 조사”, 한국교원대학교 석사논문.
- 박종원 외(1998a), “물리학에서 이론적 설명과 실험에 포함된 이상조건에 대한 고등학생과 과학교사의 이해 조사 I - 이상화의 의미와 특성을 중심으로-”, 한국과학교육학회지, 제 18권 제 2호, 209-219.
- 박종원 외(1998b), “물리학에서 이론적 설명과 실험에 포함된 이상조건에 대한 고등학생과 과학교사의 이해 조사 II - 이상화가 물리학습에 주는 시사점을 중심으로-”, 한국과학교육학회지, 제 18권 제 2호, 245-256.
- 박종원 외(1999), “물리학에서 이론적 설명과 실험에 포함된 이상조건에 대한 고등학생과 과학교사의 이해 조사 IV - 실험에 포함된 이상조건을 중심으로-”, 한국과학교육학회지, 제 19권 제 1호, 78-90.
- 송진웅(1997), “물리학에서 사용되는 중요 이상조건 개념에 대한 대학생의 이해”, 한국과학교육학회지, 제 15권 제 1호, 1-7.
- 이현선, 유정문(2004), “과학사 활용 수업이 과학 학업성취도와 태도에 미치는 효과”, 한국지구과학회지, 제 25권 제 7호, 565-575.
- 전영신(2004), “이상조건의 불충분한 고려가 실험결과에 미치는 영향”, 한국교원대학교 교육대학원 석사 논문.
- Matthews, M. R.(1994), *Science Teaching: the role of history and philosophy of science*, London: Routledge.
- 하명현 외(2001), “Development of an apparatus for two-dimensional collision experiment using a cycloidal slide”, *American Journal of Physics*, 69(11), 1187-1190.
- McMullin, E.(1985), “Galilean Idealization”, *Studies in History and Philosophy of Science*, 16(3), 247-273.
- Schecker, H. O.(1992), “Pragmatic Change in Mechanics: Implications of Historical Processes for Physics Education”, *Science & Education*, 1(1), 71-76.
- Sequeira, M. and Leite, L.(1991), “Alternative Conceptions and History of Science in Physics Teacher Education”, *Science Education*, 75(1), 45-56.

요 약

본 연구에서는 단진자의 등시성에 대한 이상화 조건을 다루는 8학년 과학교과서와 교사용 지도서를 분석하였다. 진자의 주기는 진폭에 무관하다는 등시성은 진폭이 매우 작은 경우에만 성립한다. 이를 단진자의 등시성에 대한 “이상화 조건”이라 부른다. 대부분의 8학년 과학교과서와 교사용 지도서는 이러한 이상화 조건에 대해 바르게 명시하지 않아 종종 이론과 실험 사이의

불일치를 나타내고 있다. 이러한 이론과 실험 사이의 불일치는 학생들로 하여금 실제 세계로부터 괴리감을 느끼게 하여 물리로부터 멀어지게 하는 경향을 가져다준다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 진폭에 무관한 진자의 등시성을 실험할 수 있는 대안으로 사이클로이드 진자를 제시하고 교실 수업에서 실제 활용할 수 있는 방법에 대해 논의 하였다.

주요어: 단진자, 사이클로이드 진자, 등시성, 이상화 조건