

**물리학에서 이론적 설명과 실험에 포함된 이상조건에  
 대한 고등학생과 과학교사의 이해 조사 II<sup>1)</sup>  
 - 이상화가 물리학습에 주는 시사점을 중심으로 -**

**박종원<sup>1</sup> · 정병훈<sup>2</sup> · 권성기<sup>3</sup> · 송진웅<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>(전남대학교 물리교육과) · <sup>2</sup>(청주교육대학교 과학교육과)

<sup>3</sup>(대구교육대학교 과학교육과) · <sup>4</sup>(대구대학교 물리교육과)

**A Study of High School Students' and Science Teachers'  
 Understanding of Ideal Conditions involved in the  
 Theoretical Explanation and Experiment in Physics: Part II  
 - Focused on the Implications to the Physics Learning -**

**Park, Jongwon<sup>1</sup> · Chung, Byunghoon<sup>2</sup> · Kwon, Sunggi<sup>3</sup> · Song, Jinwoon<sup>4</sup>**  
<sup>1</sup>(Chonnam National University) · <sup>2</sup>(Cheongju National University of Education)  
<sup>3</sup>(Taegu National University of Education) · <sup>4</sup>(Taegu University)

**ABSTRACT**

In this study, we discussed about the implications of the idealization, which take an important role in physics, to the physics education. First, understanding of the idealization help the physics learning itself. This is because that various types of idealizations are included in the physics terms and concepts, derivation processes of physics laws and formulas, and explanation of natural phenomena and problem solving activities. Second, understanding of the idealization can help the application of the physics world to the real world. That is, by understanding the extent and the limit of idealization used in physics world, physics students can understand the discrepancies between the real world and the physics world. And also, by modifying or eliminating the idealization, students can extend the extent of understanding about how predictions based on the idealization used in the physics world will change. To do this, we suggested the application of computer simulation program in physics laboratories. Third, idealization take an important role in the inquiry learning for students' originality. The activities of identifying or controlling the variables, as one of the principal factors of scientific inquiry, need the appropriate establishment of the ideal conditions. And to analyze the limiting case or practice the thought experiments for understanding the impossible situation in the real world, ideal conditions also are needed. This study discussed above three aspects with various concrete examples and, with Park *et al.*'s study

\*1998년 2월 12일 받음.

1) 이 논문은 1996년도 학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의한 연구의 일부임.

(Park *et al.*, 1998), present the theoretical basis for the study of students' and teachers' understanding the idealization.

**Key words** : Idealization, Physics Education, Philosophy of Science, Inquiry Learning, Simulation, Thought Experiments.

## I. 서론 및 연구 목적

갈릴레오에 의해 도입된 이상화(idealization)는 근대 과학의 특징을 규정짓는 역할을 하게 되었다(McMullin, 1985). 따라서, 현대 과학활동 속에는 수많은 이상 조건들이 포함되어 있으며, 과학자들은 지금도 필요한 여러 가지 이상조건들을 설정하면서 발견의 맥락 속에서 연구를 수행하고 있다. 따라서 이상화가 물리학에서 근본적으로 어떠한 역할을 할 수 있으며, 어떠한 특징들을 가지고 있는가에 대한 질문은 매우 중요한 질문일 수 있다.

이에 대해 박종원 등(1998)은 물리학에서 이상화가 가지는 의미와 특성에 대한 이론적 논의를 한 바 있다. 그들은 발견의 맥락에서 이상화가 중요한 역할을 한다는 점을 지적하고, 구체적으로 어떠한 방식으로 이상화를 설정할 수 있는 지에 대한 논의를 하였다. 또한, 이상화된 물리세계로부터 실제 세계를 설명하는 과정에서도 이상화가 중요한 역할을 한다는 것을 언급하였다. 이외에 물리학에서의 이상화의 의미와 특성에 대한 이론적 논의로는 매튜스(Matthews, 1982; 1987; 1994), 노왁(Nowak, 1980), 개리슨(Garrison, 1986) 등의 연구가 있다.

그러나, 이러한 연구들은 주로 물리학의 세계에서만 조명하였을 뿐, 그러한 이상화의 의미와 특성이 학생들의 물리학습에 어떠한 시사점을 줄 수 있는 지에 대한 논의는 부족한 편이었다. 따라서 본 연구에서는 주로 이상화가 물리학습에 주는 시사점에 대해 논의하고자 하면, 이를 위한 구체적인 연구 질문들은 다음과 같다.

- (1) 이상조건은 물리학습에서 어떻게 사용되고 있는가?
- (2) 이상화의 역할에 대한 학생의 이해는 어떠한가?
- (3) 실제 세계와 물리세계와의 관계에 대한 이해에서 이상화는 어떠한 역할을 하는가?
- (4) 이상화가 창의적인 과학 탐구 학습 활동에 주는 시사점은 무엇인가?

## II. 이상화가 물리학습에 주는 시사점

### 1. 물리 학습에서 이상조건기의 사용

이상조건에 대한 이해는 곧 물리 세계에 대한 이해와 밀접하게 연결되어 있다. 즉, 물리학의 세계가 이상적인 상황에서 기술된 경우가 많기 때문에 물리학의 세계를 이해하기 위해서는 물리학에서 사용된 이상조건에 대한 이해가 필요하다는 것이다. 물리학습에서 이상조건이 사용되는 경우는 크게 두 가지로 볼 수 있다: 이론적 설명과정에서 사용되는 이상조건, 실험에서 사용되는 이상조건

다시 이론적 설명과정에서 사용되는 이상조건은 다음과 같이 3가지 경우로 나누어진다.

- 물리 용어나 개념 정의에 이상조건이 포함된 경우
- 법칙이나 공식의 유도과정에 이상조건이 포함된 경우
- 현상의 설명이나 문제 해결과정에 이상조건이 포함된 경우

각각의 경우에서 이상조건이 물리학습에 주는 시사점과 구체적인 예를 제시하면 다음과 같다.

#### 1) 물리 용어나 개념 정의에 이상조건이 포함된 경우

우리가 배우는 이상화된 물리 세계는 실제로는 일상생활 속에서 경험할 수 없는 것들이 많이 있다. 따라서, 물리학의 내용을 이해하는 데에는 직접적인 경험뿐 아니라 경험을 넘어서는 이상화된 세계에 대한 사변적 노력이 필요하다. 그러나, 이상화된 세계에서 사용되는 용어와 개념들에 대해 학생들이 항상 충분히 이해하고 있다고 볼 수는 없다. 예를 들면, 송진웅(1997)은 사범대학 학생들을 대상으로 '자유낙하'라는 용어에 대해 조사하였을 때, 31.5%의 학생들이 '초속도 0으로' 또는 '수직으로 낙하한다'라고 설명한 것으로 나타나, 이상화된 용어에 대해 제한적으로만 이해하고 있음을 알 수 있었다. 또한, 실제 교과서에서도 명확하게 진술하지 않아

이러한 이해 부족을 낳게 하기도 한다. 예를 들면, 공통 과학 교과서에 다음과 같이 기술되어 있기도 하다.

“정지 상태에서 출발하여 중력만을 받으면서 낙하하는 물체의 운동을 자유낙하라고 한다.” (공통과학, K사, p. 106)

이와 같이 용어나 개념에 이상조건이 포함된 경우에는 이상조건에 대한 이해가 그 용어나 개념의 이해와 밀접하게 연관되게 된다. 몇가지 더 물리 용어나 개념에 이상조건이 포함된 예를 들면 다음과 같다.

“따라서, 식  $PV=nRT$ 이 정확히 성립하는 기체를 가 상하여 이상기체라고 한다. 이상기체는 분자간의 분자력이 작용하지 않으며, 분자는 분자력에 의한 위치 에너지가 없고 운동에너지만 가지고 있으며, 분자의 부피도 무시될 수 있는 기체이다. 그러므로 이상 기체의 부피는 절대 0도에서 0이 된다.” (공구영, 외, 1987, p.86)

“대전된 입자를 점전하로 부르기도 하며, 식  $20-4$  ( $E = k q q' / r^2$ )는 점전하  $q$ 에 의해 만들어진 전기장이다.” (Gettys, Keller, & Skove, 1996, p.10)

“자유전자 모형에서는 금속 내의 전도 전자가 그릇 속의 기체분자처럼 금속 내를 자유롭게 돌아다닌다고 가정한다.” (Halliday, Resnick, & Walker, 1993, p.819)

“그림 31-2 : 전류  $i$ 가 흐르는 무한히 긴 이상적인 솔레노이드에 암페어 법칙을 적용시킨 모습. --- 암페어 법칙을 그림 31-20의 이상적인 솔레노이드의 직각형의 암페어 곡선에 적용시키면 --- 솔레노이드 안에서의 자기장  $B$ 는 균일하고 ---.” (Halliday, Resnick, & Walker, 1993, p.901)

“그림 19.22는 이상화된 전지(내부 저항이 없는)가 이상적으로 저항이 0인 선(일반적으로 구리선도 우수하나, 초전도체로 상상할 수도 있다)으로 저항체에 연결되어 있다. 이상화된 전지란 내부저항이 0이라고 가정된 전지를 의미한다.” (Hecht, 1994)

“이상적인 유전물질은 전혀 자유전하를 갖지 않는 물질이다.”

“이상적인 축전지에서는 전력의 손실이 전혀 없다.”

## 2) 법칙이나 공식의 유도과정에 이상조건이 포함된 경우

법칙이나 이론의 유도과정에 이상조건이 포함된 경우도 마찬가지이다. 학생들은 기계적으로 유도과정을 암기하거나 당연하듯이 받아들일 뿐, 그 속에 포함된 여러가지 이상조건을 역할을 알지 못하며, 심지어 이상조건이 사용되었다는 것조차 모르는 경우가 많이 있다. 예를 들어, 아론스(Arons, 1990)는 이상기체 운동론에서 기체의 분자운동으로 기체의 압력이나 온도를 유도하는 과정에 대해 다음과 같이 지적하였다.

“기체 운동 이론에서 압력 공식을 유도하는 과정을 보면, 거의 대부분의 교재에서는 그 밑에 깔린 가정들에 대한 언급을 하지 않는다. 일부 교재에서는 그 모델에 대한 신비스러운 주장들을 늘어놓기는 하지만, 학생의 선행 경험들을 통해 가정들을 정당화하려는 시도를 하지 않는다. --- 가정에 대한 언급이 없다면, 학생들은 거의 가정이 있다는 것도 알아차리지 못한다. --- 이상기체에 대한 운동 이론은 거시적 특성과 행동을 반영하는 미시적 모델을 형성하는데 필수적인 단계이다. 그것은 단순화와 이상화라는 갈릴레오 전통에서 비롯된 것이다. 이상화는 본질적인 특성이다. 그것들은 충분히 이해되어야 하며, 컴퓨터조차도 그것의 필요성을 없애지는 못한다.” (Arons, 1990, p.274)

구체적으로 기체 운동론에서 이상기체의 압력 ( $p = \frac{nMv^2_{rms}}{3V}$ )이나 온도 ( $T = \frac{2}{3} \frac{1}{k} \bar{K} = \frac{2}{3} \frac{1}{k} \left( \frac{1}{2} mv^2_{rms} \right)$ ) 등을 유도하는 과정에서 사용된 이상조건들을 요약해 보면 다음과 같다.

- \* 기체 분자는 질점으로 표시되며, 분자의 구조는 명시하지 않는다.
- \* 기체 상태에서는 입자들간의 먼거리 상호작용이 무시되며, 직접 충돌할 때의 근거리 상호작용만이 강한 척력으로 나타난다.
- \* 기체 입자들간의 충돌은 완전탄성충돌이라고 가정한다. 그로 인해 기체 운동이 충돌에 의해서도 느려지지 않고 계속적인 운동을 하게 된다.
- \* 기체 분자와 분자 또는 용기 벽과의 충돌은 모든 각도에서 일어나며, 기체 분자의 속도 역시 0에서부터

무한대까지 다양한 순간속도를 가지고 있다.

\* 기체분자와 용기 벽과의 충돌 횟수는 엄청나게 많으므로, 용기 벽에 작용하는 압력은 일정하다고 가정할 수 있다.

옴의 법칙 ( $I = \frac{V}{R}$ )을 이끌어 내는 과정에도 저항체가 일정한 온도라는 이상적인 가정이 포함되어 있다. 일반적으로는 저항체에 열이 발생하게 마련인데 이때 발생한 열의 효과를 고려하면 비저항은 온도에 비례하게 된다:

$$\rho \approx \rho_0(1 + \alpha \Delta T)$$

이러한 특징은 열의 발생이 심할수록 명확하게 나타난다. 예를 들면, 보통 3V 꼬마전구를 이용하여 전압을 올리면서 흐르는 전류의 세기를 측정하여 보면 실제로 Fig. 1과 같은 그래프를 얻을 수 있다.

즉, 텅스텐 필라멘트인 경우에는  $\alpha = 0.0045$ 인데, 불이 켜진 경우에는 필라멘트 온도가 약 2000℃ 까지 올라가므로, 저항이 약 10배 정도 커진다는 것을 의미한다. 흔히, 니크롬선으로 실험을 많이 하는데, 니크롬선의 경우에는  $\alpha = 0.0004$ 이므로 1000℃ 정도 온도가 상승해도 니크롬선의 저항이 1.4배 밖에 증가하지 않음을 알 수 있다. 따라서, 니크롬선을 저항체로 이용하면서 니크롬선 온도가 크게 오르지 않는 경우에는 거의 이상적인 옴성 물질이라고 할 수 있다.

### 3) 현상의 설명이나 문제 해결에 이상조건이 포함된 경우

다음과 같은 전구 밝기에 대한 한 고등학교 교과서 설명을 보자(Fig. 2).

Fig. 2와 같은 설명에도 중요한 이상조건이 포함되어 있다. 즉, 병렬로 전구를 계속 연결함에도 불구하고 전구의 밝기가 일정하기 위해서는 전지의 단자 전압이 일정하다는, 또는 전지의 내부저항을 무시한다는 이상조건이 포함되어야 한다. 따라서, 이러한 경우에는 특별히 '이상화된 전지'라는 용어를 사용하기도 한다.

물론, 대부분의 건전지의 경우에 내부저항이 작기는 하지만(보통, 0.05Ω~0.5Ω), 외부저항이 어떤 크기인가에 따라 내부저항의 영향력은 달라진다. 즉, 외부저항이 건전지의 내부저항보다 큰 경우에는 건전지를 이상화된 전지로 볼 수도 있으나, 외부저항이 내부저항과 비슷한 경우에는 건전지의 내부저항을 무시할 수 없다. 예를 들면, 꼬마전구의 저항이 보통 1Ω 미만인데, 이러한 경우에는 내부저항의 영향이 크게 나타난다. 따라서, 건전지에 꼬마전구를 병렬로 2개, 3개 연결하게 되면, 건전지 내부저항에 의한 전압강하가 매우 커져서 건전지의 단자전압이 크게 떨어지게 된다. 따라서, 전구를 여러 개 병렬로 연결하면, 실제로는 전구의 밝기가 어두워지게 된다.

학생의 문제 해결과정에서도 학생들이 여러 가지 이상조건을 이해하지 못하는 경우를 많이 볼 수 있다. 예를 들면, 아론스(1990)는 '질량이 없는 실'이라는 이상조건이 포함된 문제에서 이상조건에 대한 이해부족이 문제 해결에 어려움을 낳는다는 것을 지적하였다.

"많은 학생들에게 '질량이 없는' 실이 얼마나 개념적 어려움을 주는 근원이 되고 있는가는 잘 알려진 사실이다. 학생들은 질량이 없다는 조작적 정의를 가지고 있지 못하다; 그들은 왜 실의 장력이 양끝에서 같은지 알지 못한다; 그들은 자신이 하고 있는 것이 무엇인지도 모르면

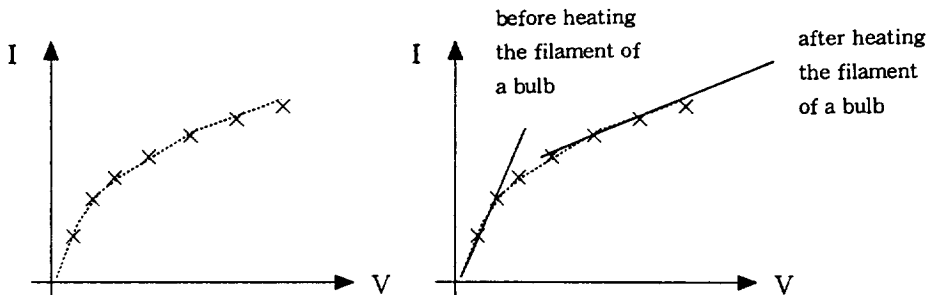


Fig. 1 The relationship between the voltage and the current flowing the bulb



Fig. 2 The textbook explanation about the brightness of bulbs connected in parallel

서 문제 해결과정을 단지 암기할 뿐이다. ... 따라서, 질량 없는 실에 대한 조심스럽고 분명한 개념적 발달은 학생에게 이러한 종류의 직접적인 문제 해결에 도움을 줄 뿐 아니라, 이제까지 그들에서 떨어져 있었던 제 2 범칙의 생생한 측면들을 기억할 수 있게 도와준다.” (Arons, 1990. p.75)

충돌 문제에서도 완전탄성 충돌이 운동량 보존법칙뿐 아니라 운동 에너지 보존 법칙도 만족되는 경우라는 것을 이해하지 못하는 경우가 많이 있다. 실제로 아래와 같은 문제를 보자.

“질량 1kg인 정지한 물체 A에 질량 2kg인 물체 B가 동속도 2m/s의 속력으로 정면 충돌하였다. 충돌 후, 물체 A의 속력이 4m/s 라면 물체 B의 속력은 얼마인가? 단, 물체의 운동에 작용하는 마찰은 없다고 하고, 완전탄

성충돌이라고 하자.”

위와 같은 문제는 교과서에서도 흔히 볼 수 있는 문제인데, 많은 학생(교사까지도)들이 단지 운동량 보존 법칙만을 적용하여(실제로 이러한 문제들이 운동량 보존 단위에서 제시된다) 충돌 후 B의 속력이 0m/s라고 구하는 것을 볼 수 있다. 그러나, 이것은 문제자체가 잘못되었다. 즉, 문제에서 충돌 후 운동에너지가 증가하는 오류를 포함하고 있다. 이러한 오류는 완전탄성충돌은 운동량 보존 법칙뿐 아니라, 에너지 보존법칙까지 만족해야 한다는 조건을 이해하지 못하기 때문에 생기는 것이다. 실제로 대학생을 대상으로 한 연구에 의하면 ‘완전탄성 충돌’에 대해 물었을 때, 단지 14%의 학생들만이 ‘운동량과 운동에너지가 보존’된다고 응답한 것으로 나타난 결과로부터도 알 수 있다(송진웅, 1997).

또 다음과 같은 문제 해결 과정을 보자.

“(예제) 전기 용량이  $0.2\mu F$ 인 평행판 축전기에 20V의 전압을 걸었다. 축전기에 충전된 전하량은 얼마인가?

(풀이) 전하량  $Q=CV=0.2\times 10^{-6}\times 20=4\times 10^{-6}=4(\mu F)$ 이다.”

이 문제 해결과정에서도 축전기가 이상적인 축전기라는 이상적인 가정이 포함되어 있다. : 이상적인 축전지에서는 전력의 손실이 전혀 없다.

그러나, 실제로는 두 금속판 사이의 유전체를 통해 전하들이 빠져나가게 되는데, 그 정도는 금속판의 기하학적인 특징과 유전체, 그리고 전압에 따라 달라진다. 예를 들면, 고전압에 사용되는 마이카(mica) 콘덴서는 저전압에 사용되는 종이 콘덴서보다 약 1000배 이상이나 전하가 많이 빠져나갈 수 있다. (Hecht, 1994, p.648)

## 2. 이상화의 역할에 대한 이해

이상화가 실제 세계를 넘어서는 가상적인 세계를 그려내고 있다는 측면으로부터 학생들이 이상조건의 사용을 어떻게 받아들이고 있는가는 흥미로운 주제일 수 있다. 예를 들면, Schecker (1992)는 254명의 학생들에게 아래의 진술문과 같은 방법이 유용한지 아닌지에 대한 의견을 조사하였다.

“물리 수업에는 종종 실제 실험으로는 분명히 이루어질 수 없는 가정이나 사고 실험들이 있다. 예를 들면, 공기 저항이나 마찰력을 완전히 배제한다거나, 무한히 계속되는 직선 운동을 가정하는 경우가 그렇다.”

조사 결과, 11%가 존재하지도 않는 것을 생각할 필요가 있겠는지를 반문하면서 이상조건의 사용을 거부하였다. 그리고, 55%의 학생들은 물리학이 어차피 실재를 다루고 있는 것이 아니기 때문에 위의 방법이 유용하다고 응답하였다: “나는 모든 것을 다 실제에 관련시킬 필요가 있다고 생각지는 않는다. 나는 단지 물리 자체에 흥미가 있다”. 단지 25%의 학생들만이 과학에서의 이상화 기법의 의미를 어느 정도 이해하고 있었다: “이상 상황은 만지고 볼 수 있는 실제들을 구성하는데 필요한 정신적 도구이다.” (Schecker, 1992)

이러한 학생의 반응으로부터 우리는 두가지 극단적인 학생의 관점을 가정해 볼 수 있다. 만일 학생들이 물리

학에서 다루는 내용이 항상 실제 세계와 동일하며 따라서 물리 세계에서 예측된 현상은 실제 세계에서 그대로 관찰될 수 있어야 한다고 생각한다면, 사용된 이상화가 실제에서도 구현될 수 있다고 간단히 생각하거나, 아니면 이상조건이 포함되어 있다는 사실조차도 알지 못하기 때문일 수 있다. 이러한 측면은 실제 학생들의 관찰이나 실험 행동에서도 미루어 짐작할 수 있다. 예를 들어, 낙하 시간을 측정하는 실험에서 측정된 낙하 시간이 이론적으로 예측된 값과 다를 경우에 많은 학생들은 실험 방법이 미숙하거나, 실험장비가 정밀하지 못하기 때문이라고 생각한다. 즉, 그 학생에게서 ‘참’인 것은 이상화된 물리 세계이며, 실제 세계에서 측정된 값은 불완전하거나 오히려 ‘거짓’이 되는 셈이다.

그와는 반대로, 만일 학생들이 물리 자체가 현실과는 유리된 이론적이고 가상의 세계라고 생각하는 경우에는 물리학에서 사용되는 이상조건이 참이 아니라는 사실을 알면서도 이상조건의 사용을 쉽게 인정하는 경우일 것이다. 그러나, 그것이 물리 세계와 실제 세계와의 완전한 괴리로 이해하고 있다면 물리학을 배울 가치나 실제 세계를 설명하기 위해 물리학을 사용할 근거가 없어지게 된다. 예를 들어, 무거운 물체와 가벼운 물체를 동시에 떨어뜨렸을 때, 학교 물리 시간에는 동시에 떨어진다고 배웠으나 그 학생은 이미 무거운 것이 더 빨리 떨어진다는 경험을 가지고 있을 수 있다. 그러한 경우에 만일 물리 세계와 실제 세계와의 차이에 대한 이해가 부족하다면, 그 학생은 하나의 머리 속에 이론적인 세계와 실제 세계에 대한 이미지를 동시에 따로 가지고 있는 셈이 된다. 그래서 학교에서는 ‘동시에 떨어진다’고 답할 것이고, 일상 생활에서는 ‘무거운 것이 먼저 떨어진다’고 응답할 것이다. 이를 가리켜 ‘구획화된 지식 체계’라고도 한다. (Solomon, 1983; Song, 1990)

위에서 살펴본 두가지 학생 입장에 대한 실증적인 연구는 매우 흥미로운 것이다. 즉, 어느 정도의 학생들이 실제 세계도 물리 세계에서 예측된 대로 똑같아야 한다고 생각하는지, 반대로 어느 정도의 학생들이 물리 세계는 어차피 실제 세계와는 동떨어진 유리된 세계라고 생각하는지에 대한 연구 조사는 물리학을 공부하는 학생을 위한 지도에 많은 시사점을 주리라고 생각한다.

## 3. 실제 세계와 물리 세계와의 관계에 대한 이해

위와 같은 두 가지 극단적인 입장을 가진 학생에게 중요한 것은 이상화된 물리 세계에서 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. 그러한 인식에서 필요한 것은 Rohrlich (1987)이 언급한 '실재의 수준(level of reality)' 차이를 학생들이 이해하는 것이다.

예를 들면, 과학을 배우는 상급학년 학생은 대부분 지구 중력이 거리의 제곱에 따라 달라진다는 것을 알고 있다. 그러나, 지표면 근처에서 어떤 물체의 역학적 에너지 보존에 대해 설명하면서 위치에너지를 다룰 때, 높이에 따라 중력가속도가 달라질 수 있다는 점을 고려하지 않는다. 즉, 지표면 근처에서는 중력 가속도가 일정하다고 가정하고, 간단히  $g=9.8 \text{ m/s}^2$  라는 상수값을 사용한다. 그러나, 지구 주위를 공전하는 인공위성이나 달의 경우를 다룰 때에는 결코 중력 가속도가 지표면에서와 같다는 가정을 할 수 없다. 그럼에도 불구하고 보통의 실험실 상황에서 중력 가속도가 일정하다고 가정할 수 있는 근거는 탐구하고자 하는 상황이 인공위성이나 달에 대한 상황과는 차이가 있기 때문이다. 마찬가지로 보통의 높이에서 무거운 작은 쇠공을 떨어뜨린다면, 공기저항이 무시된 상태에서 뉴턴의 법칙에 의해 거의 예견된 대로 낙하할 것이다. 그러나, 종이 조각을 떨어뜨리거나 좀 더 높은 위치에서 좀더 가볍고 부피가 큰 물체를 떨어뜨린다면 더 이상 공기저항을 무시했던 법칙을 적용할 수 없게 된다. 즉, 실제 세계를 설명하기 위해 학생들은 먼저 자신들이 다루는 실재가 이상화된 물리 세계와 얼마나 근접한 상태인지에 대한 인식이 선행되어야 하고, 그렇게 함으로써 물리 세계와 실제 세계와의 격차를 이해할 수 있게 된다. 나아가 이상조건을 설정하지 않는다면, 물리세계에서 그려내고 있는 세계가 어떻게 달라지고 또 실제 세계에 얼마나 근접해 가는지에 대한 이해도 필요하다.

여기에서는 실제 세계와 물리 세계와의 관계에 대한 이해를 돕기 위해 다음 두가지 측면에서 구체적인 예를 들면서 살펴보고자 한다.

- 이상조건인 범위의 한계에 대한 이해
- 시뮬레이션 프로그램을 이용한 실제 세계의 이해

1) 이상조건인 범위의 한계에 대한 이해

실제로 지표 근처에서는 중력 가속도는 일정하다는 가정을 사용한다. 그러나 그러한 이상적인 가정이 지표면으로부터 얼마만큼의 높이까지 받아들일 수 있을까? 이를 위해 높이에 따라 중력 가속도의 크기를 직접 구해보자. Table 1은  $g = G \frac{M}{(R+h)^2}$  를 이용하여 지표면에서의 중력 가속도 값에 대한 변화율을 %로 나타낸 것이다.

따라서, 중력 가속도가 일정하다는 가정은 인간이 거주하는 일반적인 상황, 예를 들면, 가장 높은 산의 경우(에베레스트 산의 경우 약 8000m)라도 거의 받아들일 수 있다고 하겠다. 그러나, 물론 인공위성의 경우(예를 들면, 정지 위성의 높이는 지표면으로부터 약 36,000 km이다)라면, 지표면에서의 중력값과 동일하다는 가정이 받아들여지기는 어려울 것이다.

이번에는, 단진자의 주기를 생각해 보자. 단진자의 주기는 다음과 같은 방정식에 의해서 구해진다.

$$ml \frac{d^2 \theta}{dt^2} = -mg \sin \theta$$

이때,  $\sin \theta \approx \theta$ 라는 이상조건을 사용하면, 단진자의 주기는  $T_0 = \pi \sqrt{l/g}$  와 같지만, 그러나 이상조건을 사용하지 않고 구한 경우에는 다음과 같다.

$$T = 2\pi \sqrt{l/g} \left( 1 + \frac{1}{4} \sin^2 \frac{\theta}{2} + \frac{9}{64} \sin^4 \frac{\theta}{2} + \dots \right)$$

따라서, 이상조건을 사용하지 않는 경우에는 초기각도가 커질수록 주기가 길어지게 되는데 이를 나타내면 Table 2와 같다.

**Table 1** The change of gravitational acceleration according to the height from the surface of the earth

Height(km)	1*	10	100	200	300	400	500	1000
Rate of change(%)	99.97	99.69	96.93	94.00	91.21	88.53	86.00	74.70

\* The gravitational acceleration at the height of 1 km is  $g = \frac{99.97}{100} g_0$  ( $g_0$  is the gravitational acceleration at the surface of the earth)

**Table 2** The change of period of pendulum according to the initial angle

Initial angle(°)	5°	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Rate of increase(%)	0.05	0.19	0.77	1.74	3.11	4.91	7.12	9.74	12.72	16.00

\* The period of pendulum at the initial angle of 5° is  $T = \left(1 + \frac{0.05}{100}\right) T_0$

따라서, 이상조건을 사용하지 않는 경우에는 초기각도가 커질수록 주기가 길어지게 되는데 이를 나타내면 Table 2와 같다.

따라서, Table 2로부터 우리는 단진자의 주기를 구하는 상황에서 이상적인 주기가 초기 진폭에 따라 실제로는 어느 정도로 변화될 수 있는지 알 수 있다.

이와 같이 현재 과학 법칙과 물리적인 해들이 어떠한 이상조건 하에서 얻어진 것인지에 대한 이해는 곧 학생들로 하여금 그러한 법칙과 물리적인 해의 한계를 인식하게 도와줄 수 있다. 따라서, 위와 같은 예들은 과학의 본성을 지도하기 위한 교육과정에서 다룰 수 있는 좋은 소재가 될 수 있다. 또한 현재의 과학 법칙과 물리적인 해가 가지는 한계에 대한 인식은 학생들로 하여금 법칙과 해를 보다 정교하게 발전시키고자 하는 동기를 제공하여 줄 수도 있다. 즉, 이상조건의 범위와 한계를 넘어서서 실제세계를 이해하고 설명하기 위해서 이상조건을 변화시켜가면서 어떻게 물리세계가 실제 세계와 가까워질 수 있는지를 이해할 수 있다.

2) 시뮬레이션 프로그램을 이용한 실제 세계의 이해

이와 같이 이상조건의 조정과 제거를 통해 실제 세계와 물리세계와의 격차를 이해하고 줄여보는 노력은 특히, 상급학교 (대학이나 대학원을 포함하여) 학생의 지도나 과학 우수아를 위한 지도에서 중요하게 고려되어야 할 점이라고 본다. 즉, 구체적으로 이상조건을 추출하고 그러한 이상조건이 어떻게 법칙과 물리학적 해에 영향을 주었는지는 판단하여, 이상조건을 조정하거나 제거함으로써 법칙과 해를 새롭게 구해보는 활동은 좋은 내용이 될 수 있을 것이다. 그러나, 이러한 경우에는 수학적 난이도가 높아지게 마련이므로 중등학교 교육과정에 도입하는 것이 쉽지 않을 것이다. 따라서, 수학적 과정에 얽매이지 않고 이상조건의 조정이나 제거에 따른 법칙이나 물리적인 해의 변화를 관찰하고 이해하는데 보다 더 초점을 두고 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램을 이용한다면, 이러한 문제에 보다 쉽게 접근해 갈 수 있다.

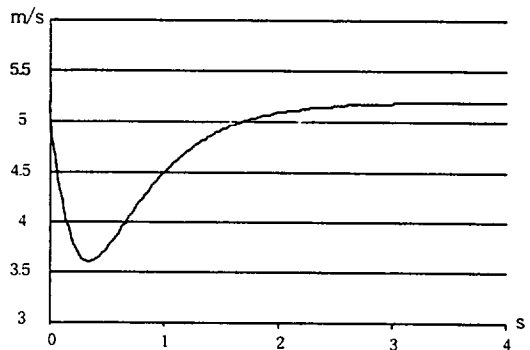
예를 들어, 'Interactive Physics'라는 시뮬레이션 프

로그램을 이용하여 공기저항을 고려할 때 수평으로 던진 물체의 운동을 분석하여 보자. 먼저 공기저항력은 다음과 같이 속도에 비례하는 경우로 하였다.

$$f = bv, \quad b = 0.11$$

질량  $m=0.1$  kg 이고 단면적  $S=0.11$  m<sup>2</sup>인 작은 구 (밀도  $\rho=0.5$  kg/m<sup>3</sup>)를 수평으로 초기속도  $v_0=5.0$  m/s 로 던진 경우에 시간에 따른 물체의 속도를 그래프로 나타내면 Fig. 3과 같이 나온다.

따라서, 초기 속도  $v_0=5.0$  m/s 였으나, 약 3.56초 후에는 종단속도  $v_t=5.2$  m/s에 도달한다는 것도 알 수 있다. 또한, 처음에는 속도가 줄다가 다시 늘어나면서 종단속도에 도달하는 것을 알 수 있다. 그 이유는 수평방향의 속력은 계속 줄면서 0으로 수렴하지만, 수직방향의 속력은 점차 증가하다가 종단속도에 도달하기 때문이다. 즉, 처음에는 수평방향으로의 속력 감소 정도가 수직방향으로의 속도 증가 정도보다 크게 나타나서 0.34초까지는 속도  $v=3.6$  m/s 까지 감소하는 것으로 나타난 것이다. 그리고 그 이후부터는 수평방향의 속도 감소 정도보다 수직방향의 속도 증가 정도가 더 크게 나타나서 전체 속도가 증가하게 된다. 그리고 3.56초 정도에서부터는 수평방향 속도는 거의 0이 되고 수직 방향 속도도 종단속도에 도달하게 되어, 전체 속도가 수직방향



**Fig. 3** The velocity of a ball throwing horizontally under the air resistance



속도와 같이 나타나게 된 것이다.

#### 4. 창의적인 탐구 활동에서의 이상조건의 사용

이상화의 의미와 특성에 대한 논의(박종원 외, 1998)에서 우리는 발견의 상황에서 이상조건의 설정이 중요한 역할을 한다는 것을 지적한 바 있다. 이는 학생들에게도 이상조건을 잘 이해하고 이상조건을 설정할 수 있는 능력을 갖추는 것이 창의적인 탐구 활동에서 중요하다는 것을 시사한다.

“과학자들이 사용하는 이상화 기법(조건들을 단순화하는 것)과 학생들이 개념 이해를 위해 사용하는 전략(모델)의 구성간에는 유사성이 존재한다.”(Niaz, 1994)

창의적 탐구 활동에서 이상조건 설정과 관련된 활동을 구체적으로 살펴보면 다음 3가지 경우로 생각해 볼 수 있다.

- 복잡한 실제 세계에 대한 관찰로부터 무엇이 중요한 측면이고 그렇지 않은 측면인지를 결정하고, 이때 중요하지 않다고 판단되는 측면의 영향을 줄이기 위해 이상조건을 설정하는 경우.
- 측정할 자료로부터 측정할 수 없는 상황, 예를 들면, 0인 경우나 무한대인 경우와 같은 이상화된 상황에 대한 값을 추정하는 경우.
- 실제로 실현시키기 어려운 실험 상황을 다루기 위해서 이상조건을 포함한 사고실험을 하는 경우.

##### 1) 변인 설정과 변인 통제 활동에서의 이상화

첫째는 발견을 위한 실험 활동을 고안할 때 이상조건이 중요한 역할을 하게 되는 경우이다. 과학자는 ‘무한한 양의 복잡한 경험들’로부터 중요한 사실이 무엇인가를 찾아내는 문제에 항상 직면해 있다. 즉, 실제 세계로부터 얻은 관찰 사실들의 양은 거의 무한적이고 상황에 따른 관찰 결과의 변화도 거의 무한적이라고 할 수 있다. 따라서, 과학자가 일관성을 찾거나 믿음만하다고 생각될 수 있는 결론을 얻기 위해서는 수많은 판단에 기초하여 무엇이 본질적으로 중요한 것인지를 결정하고, 그 이외의 모든 가능성을 가능한한 제거하려는 노력을 기울이게 된다(Faust, 1987).

이러한 측면을 구체적으로 학생들의 탐구 기능과 연

관지어 보면, 변인설정과 변인통제, 측정 변인의 조작적 정의의 활동 등과 관련되어 있다. 즉, 변인설정과 변인통제 활동에서는 무엇이 중요한 변인인가를 결정하면서 동시에 제거되거나 일정하게 유지되어야 할 변인이 무엇인가를 결정하면서 구체적으로 이상조건을 설정하게 된다. 또한, 측정변인의 조작적 정의, 즉 변인의 효과를 어떠한 측정을 통해 알아볼 것인지에 대한 활동에서도 이상조건은 포함되게 된다.

예를 들어, 물체에 힘이 작용할 때 물체의 질량과 가속도와의 관계에 대한 실험을 한다고 가정해 보자. 이때 독립변인은 물체의 질량으로, 그리고 종속변인은 물체의 가속도로 결정되므로, 다른 모든 변인은 통제되어야 한다. 즉, 물체에 작용하는 힘의 크기가 일정해야 한다. 이 외에도 물체에 작용하는 마찰을 무시하거나 일정하다고 가정해야 하며, 물체를 당길 때 사용한 실의 무게를 무시할 수 있어야 한다. 또한 실은 매우 탄탄하여 늘어나지 않는다고 가정해야 하며, 역시 속도변화에 따른 공기저항의 역할도 무시될 수 있어야 한다. 가속도 측정 방법에 있어서도 마찬가지이다. 만일 가속도 측정을 위해 타점기를 이용한다면, 타점기의 타점 간격이 일정하다고 가정해야 하고, 타점을 찍을 때 마찰을 무시할 수 있어야 하며, 타점은 순간적으로 종이테이프에 찍혀서 종이테이프에 찍힌 타점을 점으로 가정할 수 있어야 한다. 또한 물체에 달린 종이의 질량도 무시할 수 있어야 한다.

물리학사에서도 흥미로운 예를 찾아볼 수 있다. 헤르쯔는 전자기파의 속도를 측정하는 실험에서 반복된 여러 번의 실험에 의해서도 전자기파의 속도가 빛의 속도와 같다는 결과를 얻어내지 못하였다. 그러나, 그 이유는 그가 죽은 뒤에 실험실의 규모 때문이었음이 밝혀졌다. 즉, 실험실 규모가 작아서 벽으로부터 반사된 전자기파가 실험에 영향을 미쳤기 때문이었다. 따라서, 이 경우에도 실험실의 크기가 무한하다는, 즉 실험실 벽에 의한 전자기파의 영향을 무시할 수 있다는 이상조건의 설정이 필요했던 것이었다(찰머스, 변역판, p. 71). 이와 같이 새로운 규칙성과 법칙의 발견을 위해서는 실험 상황에서 어떠한 이상조건들이 설정되어야 하는지가 중요한 문제가 된다.

물론, 발견을 위한 실험상황의 고안과 실험 수행은 보다 과학적으로 우수한 학생들을 대상으로 이루어질 때 가능성이 높을 것이다. 예를 들면, 우리나라의 경우에 과학고등학교 교육과정 상에 도입되거나 과학 영재아를 위한 프로그램에서 도입될 때 적용 가능성이 더 커질 것

이다.

### 2) 극한 사례 분석에서의 이상화

둘째는 실험을 통해 얻은 자료로부터 외삽을 통해 극한의 경우에 대한 결과를 얻을 때 이상조건이 중요한 역할을 하게 되는 경우이다. 비록 직접 관찰로부터 얻은 자료는 아니지만, 좁은 범위에서 얻은 자료만으로도 실제로는 얻을 수 없는 영역에서의 현상을 추론할 수 있도록 해주는 외삽은 과학자의 사고 범위를 넓혀주는 유용한 사고 방식 중의 하나이다. 앞 장에서 예를 들었듯이 매질 속에서 무게가 다른 두 물체의 낙하 속도 비교에 대한 실험 결과로부터 매질이 없는 경우에 '두 물체의 낙하 속도는 같다'는 이상화된 상황에서의 결론이 바로 이상화를 통해 얻어진 것이다. 너세시안(Nersessian, 1992)은 물리학에서의 주요한 개념적 혁명 시기에는 추상법(abstraction technique)이라고 하는 방법이 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있는데, 이러한 추상법에 극한사례분석(limiting case analysis)이 포함된다는 점을 지적하였다.

### 3) 사고 실험에서의 이상화

셋째는 전혀 실제로 실험을 수행할 수 없는 상황임에도 불구하고, 개념을 명료화하거나 파라독스를 만들어 내기 위해서, 그리고 새로운 사실들을 발견해내기 위해서 필요한 중요한 과학활동 중의 하나인 사고실험을 수행할 때 이상조건이 사용되는 경우이다. 예를 들어, 아리스토텔레스적인 관점에 의하면 모든 물체의 운동을 자연적인 운동과 강제적인 운동으로 나누면서 물체가 지표면으로 낙하하는 운동은 물체가 지구중심을 향해 제자리를 찾아가려는 자연스러운 운동이라고 하였다. 이에 대해 갈릴레오는 지구 중심을 관통하는 우물을 파고 물체를 낙하시킬 때 지구 중심에 도착한 물체가 중심에서 정지할 것인지, 중심을 통과해서 지나갈 것인지를 사고 실험함으로써 아리스토텔레스적인 생각의 한계를 드러내게 하였다. 마찬가지로 무거운 물체가 먼저 떨어진다는 아리스토텔레스적인 생각에 대해서도 갈릴레오는 무거운 물체와 가벼운 물체를 실로 묶어 떨어뜨렸을 때, 총 무게가 늘어났기 때문에 더 빨리 떨어진다는 결론과 실제 매달린 가벼운 물체가 천천히 떨어지려는 영향을 주기 때문에 더 느리게 떨어진다는 결론을 서로 대비시킴으로써 아리스토텔레스적인 생각의 한계를 드러내게 하기도 하였다. 이러한 사고 실험들은 직접 실험을 수행하지 않거나 수행할 수 없는 상황임에도 불구하고

이상화된 상황을 설정하여 가상적인 실험을 함으로써 기존의 이론이 가진 한계를 드러나게 하여 새로운 이론의 출발을 가능하게 하였던 것이다.

또한, 발견의 상황에서 제시된 새로운 그러나 미숙한 이론들이 다른 대립적인 이론과 반론에 견뎌낼 수 있는지를 판단하는 활동에서도 이상화된 사고실험은 중요한 역할을 수행한다. 20세기 초반에 새로운 과학, 즉 상대론과 양자론이 생성되던 시기에 특별히 유명했던 사고 실험(예를 들면, 아인슈타인의 빛의 방출과 시간축정 실험, 쉬뢰딩거의 고양이, 막스웰의 도깨비 등)이 많았던 이유도 바로 발견의 상황에서의 이상화된 사고실험이 가진 중요한 역할 때문이라고 할 수 있다.

따라서, 과학사를 통해 새로운 이론이 대두되었던 당시에 수행되었던 여러 가지 사고실험들을 학생들에게 살펴보게 하는 것은 창의적 발견 활동을 간접적으로나마 경험하도록 하는 방법이 될 것이다. 물론 과학적으로 뛰어난 학생을 대상으로 한다면, 사고실험을 제시하고 결론을 내려보게 하거나, 직접 사고실험을 고안하게 하고 그로부터 새로운 주장을 할 수 있도록 하는 활동도 가능할 것이다. 그러나 실제 과학교육과정 속을 살펴보면 사고실험을 소개하는 부분은 발견할 수 있지만, 사고실험을 통해 결론을 내려보게 하거나 나아가 사고실험을 고안해 보게 하는 활동을 찾아보기 힘들다.

## III. 요약 및 결론

이상으로 논의한 '이상화가 물리학습에 주는 시사점'에 대한 논의를 요약하여 보면 Fig. 4와 같다.

Fig 4에 의하면, 물리 세계에 대한 이해를 위해서는 기본적으로 물리학습에서 이상조건이 어떻게 사용되며, 이상화가 어떠한 역할을 하는지에 대한 이해가 필요함을 나타내고 있다. 즉, 물리학습에서는 물리용어와 개념을 정의할 때, 법칙이나 공식을 유도하는 과정에서, 그리고 자연 현상을 설명하거나 문제를 해결하는 과정에서 이상조건들이 포함되어 있음을 알 수 있다.

이러한 이상조건의 사용으로 인해 필연적으로 물리 세계와 실제 세계는 정확하게 일치하지 않게 된다. 따라서, 그러한 격차의 이유를 이해하고 나아가 이상조건을 조정하거나 제거함으로써 물리세계와 이상세계와의 관계를 보다 깊이 이해하는 것이 물리학습에서 중요한 측면 중의 하나라고 할 수 있다. 그러나 그러한 활동은 고도의 수학적인 난이도를 필요로 하게 마련이고 따라서 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램의 활용이 그러한 측면의

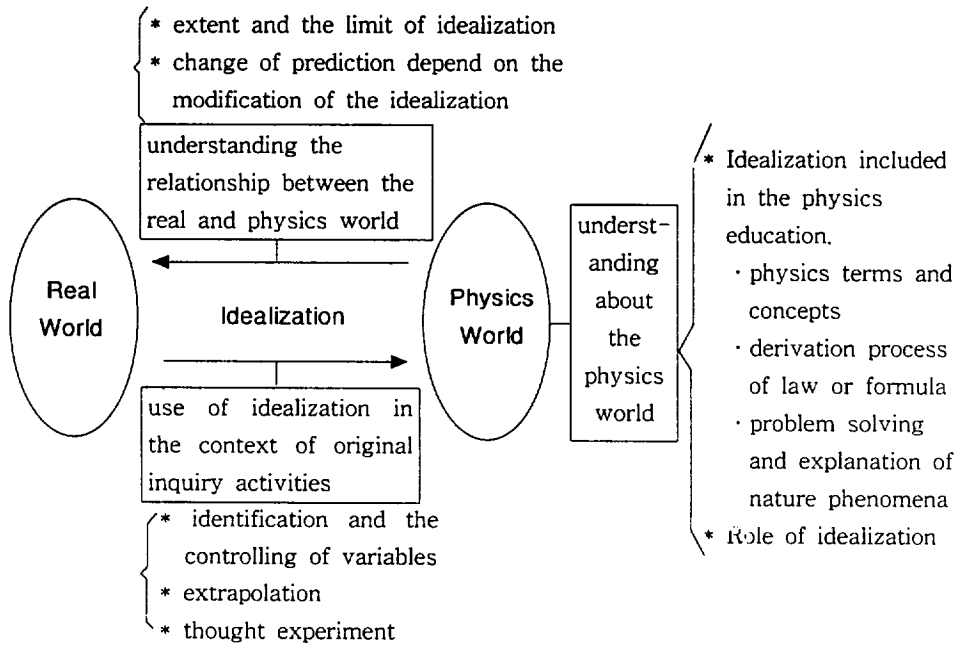


Fig. 4 The implications of idealization to the physics education

물리 학습 활동에 도움을 줄 수 있음을 본 연구에서는 제안하였다.

보다 고도의 학습활동이라고 할 수 있는 창의적인 탐구활동에서도 이상화는 중요한 역할을 한다. 즉, 변인을 설정하거나 통제하는 과정이나 외삽을 하는 경우, 그리고 사고실험을 수행하는 경우에 바로 이상조건 설정과 처리가 중요한 역할을 하게 된다. 따라서, 창의적 탐구 활동에서 이상조건 설정과 처리에 관련된 활동에 보다 깊이 관심을 기울이고, 그와 관련된 탐구 활동을 개발할 필요가 있다.

본 연구는 박종원 등(1998)의 연구와 함께, 물리학에서의 이상화에 대한 이론적 기초를 이룬다. 이러한 이론적 기초는 나아가 실제로 학생과 교사들이 이상조건들에 대해 어떻게 이해하고 있는지를 조사하기 위한 연구를 위한 방향을 설정해 줄 수 있다고 본다.

### 적 요

본 연구는 물리학에서 중요한 역할을 하는 이상화가 물리학에 주는 시사점을 세가지 측면에서 논의하였

다. 첫째, 이상화에 대한 이해는 물리세계에 대한 이해에 도움을 준다. 이것은 물리학에서 사용되는 용어나 개념, 물리법칙이나 공식을 유도하는 과정, 그리고 자연현상을 설명하거나 문제를 해결하는 활동 속에 여러 가지 이상조건이 포함되어 있기 때문이다. 둘째, 이상화는 실제 세계와 물리 세계와의 관계를 이해하는데 도움을 준다. 즉, 이상화의 적용범위와 한계를 이해함으로써 물리 세계와 실제 세계와의 격차를 이해할 수 있으며, 나아가 이상조건을 조정하거나 제거하면서 물리세계에서의 예측이 어떻게 달라지는지를 이해함으로써 실제 세계에 대한 이해의 폭을 넓힐 수 있다. 본 연구에서는 이러한 측면을 돕기 위한 하나의 학습 전략으로 컴퓨터 시뮬레이션의 활용을 제안하였다. 셋째로, 창의적인 탐구 활동에서 이상화는 중요한 역할을 한다. 탐구 활동에서 중요한 출발점 중의 하나는 탐구하고자 하는 변인을 설정하고, 나머지 변인들을 통제하는 활동인데, 이때 이상조건 설정이 필요하게 된다. 또한 실제 실험에서는 가능하지 않은 극한 상황의 분석을 위해서나, 사고 실험을 위해서도 이상조건 사용이 필요하게 된다. 본 연구에서는 위의 3가지 측면을 구체적인 예와 함께 논의하였

으며, 박종원 등(1998)의 연구와 함께 이상조건에 대한 학생과 교사의 이해조사를 위한 이론적 근거를 제시하고 있다.

### 참고 문헌

박종원, 정병훈, 권성기, 송진웅 (1998). 물리학에서 이론적 설명과 실험에 포함된 이상조건에 대한 고등학생과 과학교사의 이해조사 I: 이상화의 의미와 특성을 중심으로. 한국과학교육학회지, 209-219.

송진웅 (1997). 물리학에서 사용되는 중요 이상조건 개념에 대한 대학생의 이해. 물리교육, 15(1), 1-7.

공구영, 이보열, 최남홍, 권영환, 오수량. (1987). 고등학교 물리 II. 서울: 한서출판사.

Arons, B. A. (1990). *A guide to introductory physics teaching*. New York: John Wiley & Sons.

Chalmers, A. F. (1986). 현대의 과학철학 (What is things called science?). 신일철, 신증섭 옮김. 서울: 서광사.

Faust, D. (1987). *The limits of scientific reasoning*. Minnesota: The University of Minnesota Press.

Garrison, J. W. (1986). Husserl, Galileo, and the processes of idealization. *Synthese*, 66, 329-338.

Keller, F. J., Gettys, W. E., & Skove, M. J. (1996). 일반물리학 2 (Physics: classical and modern, 2nd Ed.). 경북대, 목포대, 순천대, 연세대, 원광대, 전남대, 번역. 서울: 화중당.

Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (1993). 일반물리학 (Fundamentals of physics: Extended, with modern physics, 4th ed.). 서강대학교 물리학과 번역. 서울: 범한서적주식회사.

Hecht, E. (1994). *Physics. Books*/Cole Publishing Company.

Matthews, M. R. (1982). History, philosophy, and science teaching. *Science & Education*, 1(1), 11-47.

Matthews, M. R. (1987). Experiment and the objectification of theory: Galileo's revolution. in J. D. Novak (ed), *Proceedings of the second inter-*

*national seminar misconceptions and educational strategies in science and mathematics* (pp.289-298). New York: Cornell University.

Matthews, M. R. (1994). *Science teaching: the role of history and philosophy of science*. London: Routledge.

McMullin, E. (1985). Galilean idealization. *Studies in History and Philosophy of Science*, 16(3), 247-273.

Naessian, N. (1992). Constructing and instructing: The role of "abstraction techniques" in creating and learning physics. in R. A. Duschl and R. J. Hamilton (eds.), *Philosophy of science, cognitive psychology, and educational theory and practice* (pp. 48~68). Albany: State University of New York Press.

Niaz, M. (1994). *Progressive transitions from algorithmic to conceptual understanding in student ability to solve chemistry problems: A Lakatosian interpretation*. paper presented at the Annual Meeting of the National Association for Research in Science Teaching (67th, Anaheim, CA, March 26-29).

Nowak, L. (1980). *The structure of idealization*. Dordrecht: Reidel.

Rohrlich, F. (1990). *From paradox to reality: Our basic concepts of the physical world*. New York: Cambridge University Press.

Schecker, H. P. (1992). Pragmatic change in mechanics: Implications of historical processes for physics education. *Science & Education*, 1(1), 71-76.

Song, J. (1990). *Effects of pupils' responses of interactions between process skill demands, concept requirements and contexts in science questions*. Ph. D. Thesis (University of London).

Solomon, J. (1983). Learning about energy: How pupils think in two domains. *European Journal of Science Education*, 5(1), 49-59.