

**물리학에서 이론적 설명과 실험에 포함된 이상조건에
대한 고등학생과 과학교사의 이해 조사 I¹⁾**
- 이상화의 의미와 특성을 중심으로 -

박종원¹ · 정병훈² · 권성기³ · 송진웅⁴

¹(전남대학교 물리교육과) · ²(청주 교육대학교 과학교육과)

³(대구 교육대학교 과학교육과) · ⁴(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 I**
- Focused on the Meaning and the Characteristics of Idealization -

Park, Jongwon¹ · Chung, Byunghoon² · Kwon, Sunggi³ · Song, Jinwoon⁴
¹(Chonnam National University) · ²(Cheongju National University of Education)
³(Taegu National University of Education) · ⁴(Taegu University)

ABSTRACT

This study is the first part of the investigation of the students' and teachers' understanding of ideal conditions in physics. To do this, here, we provided the theoretical basis for the above study by discussing the meaning and characteristics of idealization. Idealization, introduced and elaborated by Galileo therefore characterized the nature of modern science, can be generated by four procedures: neglecting the minor variables, giving without any description about the minor variables, assuming the limit case, assuming constancy or uniformity. Idealization generated by these procedures can produce models and laws from the sensory informations about real world. And physics world is constructed by formalization or mathematization of these models and laws obtained through idealization about real world. Therefore, it can be said that idealization have a major role in the context of discovery. By this aspects, physics world can be viewed as the approximation of the real world, and this view, again, give rise the philosophical debate about the reality in nature. Idealization take an important role in the process of application of physics world and the understanding the real world. That is, physicists accept the discrepancies between real world, and physics world and make a great effort to explain, moreover, reduce these discrepancies by modifying or eliminating idealization involved in physics world. Continued from this study, we will proceed to obtain the implications of idealization on the physics learning and

*1998년 2월 12일 받음.

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

investigate the students' and teachers' understanding of the ideal condition involved in the theoretical explanation and the experiment in physics.

Key words : idealization, nature of science, physics, philosophy of science, physics education

I. 서론 및 연구목적

자연에 대한 탐구에서 인간은 여러가지 한계를 가지게 된다. 원리적으로는 하이젠베르크(Heisenberg)의 불확정성 원리(Uncertainty Principle)에 의해 한계를 가질 수밖에 없을 뿐 아니라, 실제적으로도 외부로부터 정보를 수용할 수 있는 인간 감각의 한계때문에 그러하다.

또한, 인간은 외부 자연세계의 복잡성때문에 자연으로부터 정보를 수집하고 수집된 정보를 처리하는 데에도 방법론적인 한계를 가질 수밖에 없다. 즉, 보고자 하는 변인의 영향 외에 다른 모든 변인을 통제하는 것이 불가능하기 때문이다. 과학자들은 이러한 한계를 극복하기 위해 이상화(idealization)라는 창의적인 방법을 고안하였다. 즉, 과학자들은 자신이 연구하고자 하는 상황에 대해 무엇이 중요하지 중요하지 않음을 결정하면서 본질적인 측면에서 제거될 수 있다고 생각되는 어떤 특성들을 무시하곤 하였다. 그러한 이상화를 통해 자연에 대한 모델을 세우고, 다시 그 모델을 이용하여 자연 현상을 설명하거나 예측한다.

갈릴레오의 업적 중의 하나가 바로 이러한 이상조건의 도입이다. 그는 비탈면에서 물체의 운동을 설명하면서 스스로 비탈면에서 저항이 없으며, 비탈면이 매우 단단하고 매끄럽다는 조건을 가정해야 한다고 지적하였다. 그리고 관성의 법칙을 도입하는 과정에서도 구슬이 레일을 운동할 때 저항이 없다는 이상적인 가정을 도입하였다. 무거운 물체와 가벼운 물체가 동시에 떨어진다는 결론을 얻어낼 때에도 공기가 없다는 이상적인 가정을 도입하였다(Nersessian, 1992, p. 56). 이러한 이상조건의 도입은 그 당시의 과학적 사고로서는 매우 혁신적인 사고였으며, 이러한 혁신적인 사고때문에 당시 유명한 과학자인 델몬트(Guidobaldo del Monte)와 대립적인 관계에 있기도 하였다(Matthews, 1987, p. 290).

라카토스는 실제 과학자들의 역사적 사례에 기초하여 과학 활동의 특성과 과학이론의 진보를 설명하기 위해 핵과 보호대로 구성되어 있는 연구프로그램의 개념을 도입하면서 보호대는 견고한 핵을 보충하는 명시된 보

조가설과 초기조건과 관찰 언명을 기술할 때 토대가 되는 가정으로 구성되어 있다고 하였다(Lakatos, 1980). 여기에서 말하는 보조가설이나 초기조건 또는 가정 속에도 역시 이상조건이 포함되어 있다.

이상화는 학생들의 물리학습에도 여러가지 측면에서 영향을 준다. 질점(mass point)이나 이상기체(ideal gas)라는 물리 용어들은 일반적인 물리학습에서 일상적으로 사용되는 이상화에 해당되는데, 이에 대한 기본적인 이해가 부족한 경우에는 그와 관련된 물리 현상을 이해하는데 어려움을 주게 된다. 물리 문제 해결과정에서도 마찬가지이다. 질량을 무시할 수 있는 상황인지, 공기저항을 무시할 수 있는 상황인지에 대한 판단은 문제 해결에 결정적인 영향을 줄 수 있다. 그리고 그러한 이상조건에 대한 이해 부족은 다른 문제로의 적용에 적지 않은 어려움을 야기시킬 수 있다(Arons, 1990, p. 75). 또한, 이상조건은 추상적인 물리 개념과 실제 현상이 보통의 경우에 왜 서로 일치하지 않는지를 이해하는데에도 도움이 된다. 따라서, 이상조건에 대한 이해가 부족한 경우에 물리적 상황과 실제 현상간의 괴리를 해결하지 못하고, 학생들은 과학적 지식과 일상생활적 지식을 서로 분리된 지식체계로 가지게 될 수 있다(Song & Choi, 1994; Choi & Song, 1996; Solomon, 1983).

학생들이 이상조건을 어떻게 이해하며, 과학 활동에서 이상조건을 어떻게 적용하는지에 대한 이해는 학생의 개념구조를 보다 깊이 파악하는데 도움을 줄 수 있다. 예를 들어, 스트라이크와 포스너(Strike & Posner, 1992)는 개념구조를 단지 몇 개의 주요 개념들이나 개념들간의 관계에 대한 것으로 보기보다는 개념생태계로 보는데, 이때 이상조건에 대한 이해도 개념생태계를 이루는 하나의 요소로 볼 수도 있을 것이다.

이와 같이 물리학과 물리학습에서 이상조건은 여러가지 측면에서 중요한 역할을 한다. 그러나 이상조건에 대한 몇몇 연구들은 주로 과학사나 과학철학적인 입장에서 다루거나(예를 들면, Nowak, 1980; Krajewski, 1982) 과학 이론의 검증과정에서의 이상화의 역할에 대한 연구로 레이몬(Laymon, 1985)의 연구가 있을 뿐이다. 물리학습 분야에서도 마찬가지이다. 단지, 메튜스

(Matthews, 1982; 1987; 1994)가 이상조건에 대한 연구들을 수행하였지만, 구체적으로 물리학습과 연관짓지는 않았다. 따라서, 본 연구에서는 물리학습 분야에서 구체적으로 이상조건이 어떻게 사용되고 어떠한 역할을 할 수 있는지, 그리고 실제로 학생과 교사들은 이상조건에 대해서 얼마나 이해하고 있는지를 밝히고자 한다. 이를 위해서는 먼저, 이상조건에 대한 이론적 정리가 필요하다 하고 본 연구에서는 주로 이상조건의 의미와 특성에 대한 논의를 하고자 한다. 구체적인 연구 질문들은 다음과 같다.

- (1) 이상화는 물리학에서 어떻게 도입되게 되었는가?
- (2) 이상화하는 방식들에는 어떠한 유형들이 있는가?
- (3) 과학적 모델과 법칙을 구축하는 발견의 맥락에서 이상화는 어떠한 역할을 하는가?
- (4) 이상화가 가지는 근사적 특성은 어떠한 문제를 야기시키는가?
- (5) 이상화를 통해 실제 세계를 설명하는 과정은 어떻게 이루어지는가?

본 연구는 이상조건에 대한 일련의 연구 중, 처음 부분에 속한다. 즉, 본 연구에서의 이론적 논의를 기초로 하여 후속연구에서는 보다 구체적으로 이상조건이 물리 학습에 주는 시사점을 조사하게 될 것이고, 나아가 학생과 교사들이 이러한 이상조건에 대해 어떻게 이해하고 있는지를 조사 분석하게 될 것이다.

II. 이상화의 의미와 특성

1. 이상화의 도입과 과학의 특성으로서의 이상화

물리학 속에는 여러가지 형태의 이상조건들이 포함되어 있다. 예를 들면, 지구의 표면이 평편하다고 하거나, 구르는 구슬이 완벽하게 등갈라고 보는 경우가 그것이다. 이러한 이상조건은 복잡한 실제 세계를 이해하는 한

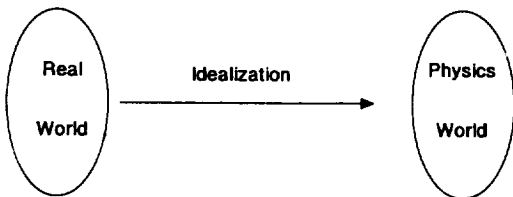


Fig. 1 Construction of physics world from real world through idealization

방법으로서 이상조건없이 불가능한 계산과 사고를 가능하게 해주는 역할을 한다. 그러나 본질적으로는 이러한 이상화를 통해 과학자들은 실제 세계로부터 이상화된 물리세계를 구성하게 된다(Fig. 1).

이러한 이상조건은 갈릴레오에서부터 도입되었으며 그가 도입한 이상화 기법은 근대과학의 특징을 이루는 요소가 되었다.

“갈릴레오가 복잡한 실제 세계에 접했을 때, 그는 좀 더 특별한 방식으로 이상화하였다. 그는 원래의 문제와 유사한 보다 간단한 상황으로 관심을 돌렸고, 따라서 문제를 보다 더 쉽게 해결할 수 있게 하였다. ... ‘갈릴레오 방식’의 이상화는 곧 새로운 과학의 특징을 규정짓는 요소가 되었다.”(McMullin, 1985)

다음은 갈릴레오가 실제로 빗면에서의 물체의 운동을 기하학화하는 과정에서 그가 사용한 이상조건에 대해 진술한 말이다.

“그러나 이러한 증명에서 부수적인 저항(물체와 비탈면의 거친 면에 의한 또는 물체의 모양에 의한)이 없다는 가정을 이해해야만 한다. 우리는 평면이 비실제적인 물질이라는 가정, 즉 매우 매끄럽고 완벽하게 단단하다는 가정을 해야 한다. ... 그리고 운동하는 물체도 완벽하게 매끄러워야 하고, ... 물체가 매우 단단하다고 가정해야 한다.”(Matthews, 1994, p. 113)

그 당시로는 이러한 이상조건의 사용이 매우 혁명적이었으며 다른 학자들로부터 반박을 받기도 하였다. 즉, 실제로는 가능하지도 않은 이상조건을 사용하였다는 것이 실제 자연현상을 왜곡한 것이며, 따라서, 이상조건을 사용한 설명은 실제 현상에 대한 것이 아니라는 것이었다. 갈릴레오 자신도 그의 대화체인 “Two New Sciences”에서 아리스토텔레스의 대변인인 심플리치오(Simplicio)가 새로운 과학에 깔려있는 이상화 기법을 강하게 반박하는 것으로 기술하였다(McMullin, 1985). 다음은 평면 위에 놓인 구에 대한 논의에서 심플리치오가 의문을 품고 질문한 예이다.

“... 궁극적으로 이러한 수학적인 치밀성은 추상적인 것에서만 옳으며, 그것이 적용될 때에는 감각적인 물리세계에 대응되는 것이 없다. 예를 들어, 수학자는 자신들의 이론을 통해 구가 평면과 한 점에서 만난다는 것을 보일

수 있을 것이다. ... 그러나 우리가 물질에 대해 다룰 때에는 다르다. 그래서 나는 여기에서 말하는 모든 접촉각이나 비례관계들이 감각적인 물질들을 다룰 때에는 아무 것도 말해주는 것이 없다고 생각한다. (p. 193) ... 물질적인 구는 비물질적인 것이 가지고 있지 않은 여러가지 부수적인 것들을 가지고 있다. 금속구가 평면 위에 놓여 있을 때 평면이 약간 들어가거나, 접촉점에서 구가 안으로 들어가지 않겠는가? 더구나 평면이 완벽하다고 볼 수 없고, ... 그리고 구의 중심에서부터 표면까지의 거리가 일정한 완벽한 구를 발견하기도 결코 쉽지 않을 것이다.” (Finocchiaro, 1997. p. 198)

갈릴레오식의 이상화는 물리학의 발전에 있어서 기념비적 업적이라고 할 수 있으며, 나아가 인간의 사고를 특징지우는 요소라고 할 수 있다(Matthews, 1992, p. 37). 다음 절에서는 이러한 이상화가 구체적으로 어떠한 방식들을 통해 이루어지는지를 논의할 것이다.

2. 이상화의 유형

이상화를 구축하는 방법에는 몇가지 방법들이 사용된다. 첫째, 특정 요소 자체를 무시하는 방식으로 이상화를 할 수도 있고, 둘째, 특정 요소들에 대한 특성을 기술하지 않은 방식도 있다. 그리고 셋째로 특정 요소에 대한 극한값(예를 들면, 0이나 무한대)을 취하는 방식이 있으며, 마지막으로 특정 요소가 일정하거나 균일하다고 가정하는 등의 방식이 있다.

먼저, 맥물린(McMullin, 1985)에 의하면, 실제 세계로부터 이상화된 물리 세계를 구성하는 과정에서 두가지 기법이 있다고 지적하였다: 형식적 이상화(formal idealization)와 재료적 이상화(material idealization)

“이러한 모델을 구축하는데 있어 이상화는 두가지 다른 방식으로 도입된다. 제시된 설명에 관련되어 알려진(또는 알려질 것으로 예측되는) 특성들이 결과를 얻기 위해 단순화되거나 무시되는 경우이다. 뉴턴은 지구의 인력에 의해 태양도 작은 운동을 해야 한다는 것을 알고 있었다. 그러나 프린키피아에서 케플러 법칙을 유도하는 과정에서 그는 태양이 정지해 있다는, 즉 태양이 무한히 무겁다는 가정을 하였다. 이것은 이론적 법칙이 보다 쉽게 유도될 수 있도록 하였고, 물론 근사적인 결과일 뿐이다. 이러한 종류의 이상화를 우리는 형식적 이상화라고 부르고자 한다. ... 한편, 모델에서 탐구하고자 하는 것에 직접

관련이 없어 보이는 특성들을 명시하지 않고 남겨둘 수도 있다. 기체 운동 이론에서 기체는 분자들이 집합적으로 모여있는 구성물로 본다. 그러나, 이러한 분자들의 내부 구조를 명시하지는 않는다. 물론 어떠한 구조를 가지고 있다는 것을 배제하지는 않는다. 그러나 분자 내부에 무엇이 있는가?라는 질문에 답하지 않는다. 그 이유는 바로 그것이 이론(기체분자 운동 이론)의 특별한 목적과는 무관하기 때문이다. ... 충분히 있으리라고 예상되는 다른 특성들에 대한 질문들은 새로운 다른 이론적 필요에 의해 모델이 확장되지 않고는 답해줄 수 없다. 이러한 이유로 재료적 이상화라고 불리워질 수 있는 것이다. ... 형식적 이상화와 재료적 이상화는 과학자들이 사용하는 한 가지 기법, 즉 이상화를 구축하는 두가지 다른 측면이다.”(McMullin, 1985)

이상화의 세 번째 기법은 외삽을 통해 극한 상황을 가정하는 방법이다. 즉, 관찰된 값에 기초하여 직접 관찰할 수 없는 극한 상황에 대한 추론을 하기 위해 외삽을 사용하는 것은 이상화의 한 방법이라 할 수 있다. 예를 들어, 아래 그래프와 같은 공기 중에서 낙하하는 두 물체의 속력 차이와 매질의 저항과의 그래프를 보자(Fig. 2).

위와 같은 그래프에서 \times 표시만이 실제로 측정된 값이고, 결코 매질의 저항이 0인 경우에 대한 실험값은 얻을 수가 없다. 그러나, 우리는 측정값들 사이의 값을 내삽하여 매끄러운 곡선으로 표시하는 방법을 알고 있으며, 나아가 외삽을 통해 측정값 밖의 값이 어떻게 될지도 추론해 낼 수 있다. 즉, 매질의 저항이 0인 경우를 외삽하여 봄으로써 우리는 “매질이 없는 경우에 낙하하는 두 물체의 속력은 항상 같다”는 극한상황에서의 결론을 얻을 수 있다(Garrison, 1986).

마찬가지로 전지의 기전력도 외삽을 통해 전류가 흐르지 않는 극한 상황에서의 전지 단자전압으로부터 알아낼 수 있다(Fig. 3).

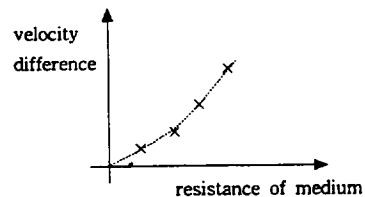


Fig. 2 Approach to limit 0 by extrapolation

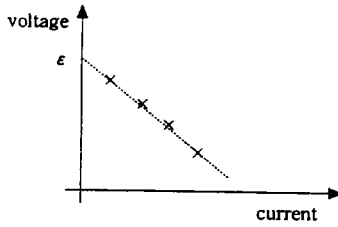


Fig. 3 Analysis of limiting case by extrapolation

즉, 위와 같은 경우에 전류가 흐르지 않고는 단자 전압을 실제로 측정할 수 없음에도 불구하고, 흐르는 전류가 0이라는 극한상황을 설정함으로써 전지의 기전력을 알아 낼 수 있다.

극한 상황에 대한 값은 단지 0인 경우만 있는 것은 아니다. 무한대의 경우를 가정하고 그때의 현상을 설명하는 방식도 이상화의 하나이다. 예를 들면, 지구 중력장으로부터 탈출속도를 정의할 때 다음과 같이 한다.

“물체를 연직 상향으로 쏘아올리면, 흔히 그것은 점점 느려져서 순간적으로 멈추었다가 지구로 돌아온다. 그러나 처음 속력이 어떤 값이 되면 계속 위로만 올라가서 이론적으로 무한대에서만 정지하는 경우가 생긴다. 이러한 처음 속력을 탈출속력이라 한다.”(Halliday, Resnick, & Walker, 1995. p. 413)

이상화를 설정하는 네번째 방법은 특정 변인들이 일정하다고 하거나 균일하다고 가정하는 경우이다. 대표적인 경우가 일정한 중력장인 경우인데, 구체적인 예를 제시하면 다음과 같다.

“자유낙하하는 경우에 가속도는 항상 g 이며, 운동의 종류에 상관없이 항상 아랫방향이다.”(Hecht, 1994. p. 73)

실제로 이와 같이 중력 가속도가 일정하다고 한 경우에만 다음과 같은 잘 알려진 공식들을 유도할 수 있다.

“물체의 초속도 0으로 떨어지는 경우 연직 아래 방향을 (+)라 하면, $v_0=0$ 이고 $a=g$ 인 등가속도 직선 운동을 하므로 (I-12)식에서 t 초 후 물체의 속도 v 는, $v=gt$ 가 되며, t 초 후의 물체의 변위 y 는 (I-13)식에 의해, $y=$

$$\frac{1}{2} g t^2 \text{이 된다}”$$

열역학에서의 여러가지 변화 과정에서도 특정변인들이 일정하다고 가정한 경우가 많이 있다. 다음은 그들 중의 한 예이다.

“기체의 온도를 일정하게 유지하면서 부피가 변하는 과정을 등온변화라고 하며, 이때에는 온도가 일정하므로 위 식에서 $dU=0$ 이 되어 기체에 흡수된 열에너지가 모두 일로 된다.”(공구영 외, 1987, p. 102)

마찬가지로 어떠한 값이 보존된다고 가정하는 경우도 네번째 이상화에 포함되며, 그 예를 들면 다음과 같다.

“운동에너지가 보존되는 이러한 충돌을 탄성 충돌이라고 한다.”(Halliday, Resnick, & Walker, 1995. p. 254)

요약하면, 이상화의 기법에는 특정 요소를 무시하거나 없다고 가정하는 방식, 특정 요소에 대한 특성을 기술하지 않는 방식, 외삽 등의 방법을 통해 0이나 무한대의 극한 상황을 추론하는 방식, 특정 요소들이 일정하거나 균일하다고 하거나 또는 보존된다고 하는 방식이 있을 수 있다(Fig. 4).

3. 발견의 맥락에서 이상화의 역할

근대과학 이후, 이상화의 도입은 과학이 기하학화 되고 수학화 될 수 있도록 하는데 중요한 기여를 하였다. 경험주의와 달리 합리주의자의 전통에 따르면, 실제 세계를 이해하는데 능동적인 마음과 지식이 중요한 역할을 한다. 그리고, 실제 세계의 운행법칙을 이해하기 위한 일관된, 만족스러운 그리고 보다 우아한 설명을 찾아내려고 하는 과정에서 수학적이고 기하학적인 방식이

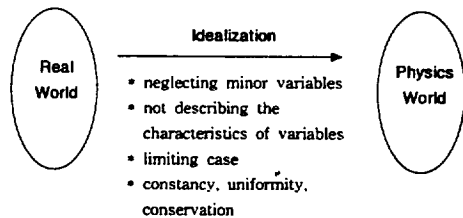


Fig. 4 Various types of idealization

도입되게 된다.

이때, 이상화가 하는 역할이 바로 단순화되고 수학적화된 모델과 법칙을 찾아낼 수 있도록 도와주는 것이다. 즉, 모델과 법칙은 관찰만으로는 만들어질 수 없다. 그것은 실제 세계가 생각처럼 깔끔하고 일관적이고 간단하지만은 않기 때문이다. 만일, 실제 세계에 대한 관찰만으로 모델과 법칙이 만들어질 수 있다면, 왜 갈릴레오 이전에도 진자는 흔들리고 있었고, 흔들리는 진자를 관찰했던 수많은 천재들이 있었음에도 불구하고 갈릴레오만이 진자의 동시성이란 법칙을 구축하게 되었는가에 대한 질문에 답하기가 어려워진다.

“수세기 동안 사람들은 과학적 목적에서 뿐 아니라 활동이나 사건의 진행을 결정하는 일상 생활이나 해수면을 결정하는 중요한 항해문제를 위해서도 시간의 정확한 측정정에 관심이 있었다. 동시성을 가진 진자가 이러한 모든 문제에 대한 해답임에도 불구하고 그렇게도 명백했던 것을 모두가 인지하지 못했다는 것은 시사하는 바가 있다. 즉, 그것은 단순해 지각의 문제가 아닌 보다 깊은 문제, 즉 형이상학적 문제가 포함되어 있다는 것을 의미한다.”

매튜스(Matthews, 1994)는 갈릴레오 이전에 많은 천재들이 진자 운동에 대해 관심이 있었던 예를 구체적으로 들었다. 즉, 오림(Nicoke Oresme)은 14세기에 지구 중심을 통과해서 반대편으로 뚫린 구면으로 물체를 떨어뜨리는 사고 실험을 설명하기 위해 진자가 흔들릴 때마다 매번 같은 높이에 간다는 사실을 이용한 점, 1490년 후한 레오나르도 다빈치가 시계처럼 보이는 것에 진자가 연결되어 있는 그림을 그렸으며, 비탈 직선보다는(진자의 궤적과 같은) 원호를 따라 내려오는 것이 더 짧은 시간이 걸린다는 것을 알고 있었다는 점, 1569년 베손(Jacques Besson)이 기계톱을 고르게 하거나, 풀무, 펌프, 그리고 연마기 등에 진자 운동을 사용하는 것을 다룬 책을 출간했던 점 등을 예시로 들었다. 그럼에도 불구하고 갈릴레오가 진자의 동시성을 발견하게 된 것은 발견의 과정에서 관찰 자체보다는 기하학과 수학이 중요한 역할을 하게 되었기 때문임을 지적하였다.

“피사대학에서 이룩한 갈릴레오의 중요한 업적은 “운동에 대하여(On Motion)”이다. 거기에서 그는 자연철학자들 사이에서 논의되었던 여러가지 문제들-자유낙하, 지레 위에서의 운동, 비탈면에서의 운동 그리고 원운동-을 다루었다. 그 논의들에서 물리적 상황들이 기하학적

으로 묘사되었고, 여러가지 결론을 내리기 위해 수학적 추론이 사용되었다. 갈릴레오의 천재성은 위에서 언급한 모든 운동들이 한가지 기하학적 구조물로 다루어질 수 있다는 것을 보았던 것이다. 나아가 이러한 구조물로 진자운동을 묘사하였다. 즉, 실제세계에서는 그렇게 어렵게 보였던 운동이 묘사될 수 있었으며 일상적인 방식으로 다루어질 수 있었다. ... 갈릴레오는 여기에서 중요한 이상조건을 도입하였다.”(Matthews, 1994., p. 111-113)

이와 같이 이상화가 새로운 모델이나 법칙의 구축에서 중요한 역할을 한다는 것은 곧, 과학적 활동은 직접 관찰을 기술하는 귀납적 활동뿐 아니라, 상상에 의한 그리고 가상적인 세계에 대한 사변적 활동이 중요하다는 것을 뜻한다(Fig. 5). 어떤 학자는 이론적 모델의 구축 과정이 곧 이상화의 설정과 동일하다는 표현을 하기도 하였다.

“모델을 구축하는 과정, 즉 이상화의 설정은 비-아리스토텔레스적인 과학을 이루는 특성이 되었다.”(Niaz, 1994)

4. 이상화의 근사적 특성

이상화가 실제 세계로부터 출발하였지만, 실제 세계 그 자체가 아니라라는 점, 오히려 실제 세계에서는 이루어질 수 없는 극한 사례(limiting case)이거나 가상적인 상황이라는 점은 곧 이상조건을 포함한 물리학의 여러 법칙들이 결국은 실제 세계에 대한 근사일 뿐이라는 것을 의미하기도 한다.

“사람들은 이상화와 추상화를 사용하여(자연의) 복잡성에 대처하는 방안을 터득하였다. 그들은 탐구하고자 하는 상황에서 불필요하게 자세하다고 생각되는 특정 요소들을 무시하곤 한다. 그래서 그들은 자연을 이상화하고, 결국 자연에 대한(이상화된) 모델은 더 이상 실제와 일치하지 않게 된다. 그 결과는 실제에 대한 근사인 것이

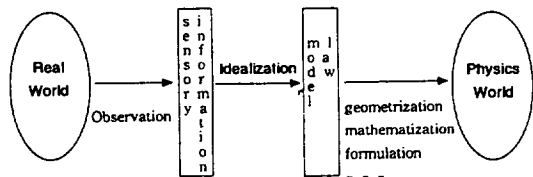


Fig. 5 Idealization in the context of discovery

다.”(Rohrlich, 1990. p. 6)

즉, 이상화라는 것은 물리학에서 실용적인 측면에서는 매우 유용한 것이지만, 그것 자체가 실제세계에 대한 진실이라고 할 수는 없다. 단지 우리가 세운 이론적 법칙과 모델에 보다 강력한 설명력을 부여해 줄 뿐이라고 할 수 있다(McMullin, 1985).

“이론 물리학에서 발견되는 강력한 설명력을 가진 법칙들은 진실을 말해 주는 것이 아니다. ... 우리는 구체적인 상황에서 어떻게 될 것인지에 대해 물리학이 주장하는 것을 검증할 수 있는 자세한 전문 기술을 가지고 있다. 우리가 기본 법칙들이 진정으로 무엇을 시사하는지를 알고자 한다면, 그것들이 일반적인 기준들을 만족하지 않는다는 것을 알게 된다. ... 우리는 기본 법칙들이 말하는 것을 개선하기 위해 근사를 사용하고 원인들을 조합하여 다른 여러 변인들을 통제한(ceteris paribus) 법칙으로 설명한다. 이러한 모든 경우에 있어서 기본 법칙들은 사실을 곧바로 언어낼 수는 없다.”(Cartwright, 1983. p. 3)

이상조건 자체가 실제 세계에서 보면 근사일 뿐이라는 측면은 이상조건을 포함한 과학 법칙의 검증과정에서도 간과할 수 없는 문제를 야기시킨다. 예를 들어, 레이몬(Laymon, 1985)은 이상조건이 근사와 같다는, 즉 이상조건이 결코 현실적으로는 참일 수 없다는 사실로부터 가설이나 이론의 검증이 근본적으로 가능하지 않을 수 있다는 점을 지적하였다.

“먼저 형식적으로는 후건 부정식으로 표현될 수 있는 반증의 경우를 생각해 보자.

T & I → P (T : Theory, I : Ideal Condition,
not P P : Phenomena)

not T and /or not I

비록 전제가 참이라고 하더라도, 논리적으로 이론이 참이거나 거짓이라는 결론을 얻을 수 없다. 얻을 수 있는 결론은 이론이 거짓이거나 /이고 이상화가 거짓이라는 것이다. 그러나 이미 우리는 이상화가 거짓이라는 것을 알고 있다. 따라서, 논리적으로 이론의 참과 거짓에 대해 얻을 수 있는 것은 아무 것도 없다.”(Laymon, 1985, p. 148)

결국 이상조건이 포함된 이론이나 예측은 모두 실험적으로 검증될 수 없다는 특징을 갖게 된다. 어쩌면 이것이 이론을 반증하는 사례가 제시되어도 과학자들이 쉽게 이론을 폐기하지 않는 이유가 될 수도 있을 것이다.

그러나, 이상화의 특성에 대해서 전혀 반대의 입장을 취할 수도 있다. 즉, 이상조건을 사용하고 있는 물리학의 세계가 오히려 참 진리의 세계이고, 실제 세계는 참의 세계가 흐려지고 어지러운 상태에서 복잡하게 나타나게 된 것이라는 관점이 그것이다.

“갈릴레오/뉴턴 물리학의 중요한 발달은 감각 경험의 한계로부터 벗어나게 하였다. 새로운 과학에서 사물의 진정한 질서는 감지할 수 있는 현상 뒤에 숨어 있다. 진정한 실재는 이상적인 상황이다. 만지고 볼 수 있는 실체들은 진정한 질서가 불완전하게 나타난 것뿐이다.”(Schecker, 1992)

이에 대한 철학적 해결은 쉽지 않을 것이다. 그러나, 실제 과학을 수행하는 과학자의 경우에는 둘 간의 문제를 해결하는데 다른 입장을 취할 수 있다. 즉, 실제 세계와 물리 세계간에 무엇이 참이고 진리인가에 대한 결정에 관심이 있기 보다는, 이상조건에 의해 발생된 실제 세계와 물리 세계와의 격차를 합리적으로 설명하고, 그 격차가 설명할 수 없을 정도로 커지게 되면 그러한 격차를 줄이기 위한 끝없는 노력을 기울이게 된다. 이에 대한 자세한 논의는 다음 절에서 다루고자 한다.

5. 실제 세계로의 이상화의 적용

1) 이상화로부터 실제 세계의 설명

이상화된 물리 세계는 비록 몇 가지 한정된 실제 세계로부터 만들어진 것이지만, 이것은 다시 실제 세계의 여러가지 다른 상황에 적용되게 된다. 이때에도 이상조건이 사용되면서 여러가지 실제 세계를 다양하게 설명하

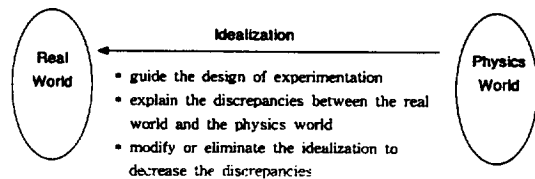


Fig. 6 Understanding the real world from the physics world through idealization

게 된다(Fig. 6).

이러한 측면의 중요성에 대해 아인슈타인은 다음과 같이 언급하였다.

“순수한 논리적 사고는 우리에게 경험의 세계에 대한 어떤 지식도 안겨주지 못한다. 실제에 대한 모든 지식은 경험으로부터 출발하고 경험으로 끝난다. 순수하고 논리적인 수단으로 도달된 명제는 실제의 측면에서는 완전히 공허한 것이다. 갈릴레오는 이러한 사실을 직시하였기 때문에 그리고 특히 이를 과학의 세계에 주입하였기 때문에, 그는 현대 물리학의 아버지인 것이다.”(Einstein, 1954, p. 271-272)

여기에서 갈릴레오가 직시한 측면이란, 물리학자의 작업에는 이상화된 물리 세계를 창안하는 것뿐 아니라, 그로부터 다시 실제 세계를 설명하거나 예측하는 일까지 포함된다는 것을 뜻한다. 이에 대해 매튜스(Matthews, 1987)의 다음과 같이 말했다.

“하지만 그(갈릴레오)의 노력은 순수 이상에 대한 것만은 아니었다. 그는 자신의 이론적 물체를 반영하는 실제 물체의 운동에 대한 실제 조건들을 정교화하려고 노력하였다. (Matthews, 1987)

결국, 과학개념의 형성과정에는 단지 실제 세계로부터 이상화된 세계를 구성하는 것뿐 아니라, 이상화된 세계와 실제 세계와의 관계를 명확하게 규정하는 것까지를 포함한다고 할 수 있다.

“관성의 개념을 발명하기 위해서는 실제 세계의 현상들로부터 수학적 관계의 용어로 정의되는 이상화된 실체를 구성하는 방법을 찾아내고, 그러한 이상화된 표상이 거꾸로 자연 세계를 어떻게 사상하는가를 찾아내는 것이 필요하다.”(Nersessian, 1992)

이러한 과정들을 가리켜 가리슨(Garrison, 1986)은 특별히 이상화 2라고 명명하기도 하였다(여기에서 이상화 1이란, 이상화된 물리세계를 구축하는 것을 의미한다).

“일단 이상적 한계 상황이 주어지면, 갈릴레오는 기하학적으로 만들어진 이상적 공식을 경험에 적용하였다. 그는 직관적 세계에 대한 보다 더 정밀한 결정(설명)들에

도달하였다. 이것이 내가 말한 이상화 2에—순수 이상적인 것에서 경험의 세계로의 결정(설명) 활동—해당되는 것이다. 자연 법칙을 규정적으로 사용함으로써 갈릴레오식 과학자들은 후설이 말한 바와 같이 아폴로의 기적을 얻게 되었다.”(Garrison, 1986).

2) 실제 세계에 대한 규정적 역할

“모든 사물은 그 사물의 상태를 변화시키려는 힘이 작용하지 않고 강제하지 않는 한 자신의 상태, 즉, 정지하였거나 또는 일정하게 직선으로 움직이고 있는 상태에 대하여 고집이 매우 세다’... 이 법칙은 복잡한 것이 아니고 아주 간단하며 또한 매우 일목요연하다. 단지 문제가 되는 것은 도대체 언제 그런 일이 일어나는가에 대한 것이다. ... 우리가 매일 경험하는 바로는 가만히(움직이도록) 놔둔 물체는 결국은 정지하게 된다는 것 이외에 아무 것도 아니다. ... 곰곰히 생각해 본 사람이라면 정말 그 법칙이 옳은 것인지 의심을 했어야만 한다. ... 관성의 법칙은 이렇게 매우 간결한, 그러나 바로 그 이유때문에 목전에서 쉽게 발견되는 것이 아니라 의식적으로 발굴된(즉, 추상화되고 이상화된), 그래서 생활 주변에서는 발견될 수 없는 상황을 서술하고 있다.”(Wagenschein, 1988)

이와 같이 이상조건이 사용된 물리 세계로부터 실제 세계를 조망할 때 한가지 특성은 물리 세계가 실제 세계를 수동적으로 설명하고 있다기 보다는 이상화된 물리 세계가 실제로 구현되기 위해 실제 세계가 어떠한 조건에 놓여야 하는지 그 규정을 제시한다는 것이다. 즉, 능동적으로 실제 세계를 조작하여 이상화된 물리 세계가 나타날 수 있도록 한다는 것이다.

“갈릴레오의 새로운 과학은 단순히 세계가 어떻게 운행하는지에 대한 것이 아니라, 어떻게 운행되어야 하는지에 대한 대한 것이다. 달리 말해서, 그의 과학은 여러가지 조건, 어떻게 세계가 운행할 것인지에 대한 것이다.”(Matthews, 1994)

과학자들은 이러한 규정적 역할을 이용하여 이상화된 물리 세계에서의 법칙과 이론을 실제 세계에서 검증하려 한다. 검증하기 위한 실험 상황을 고안하는 과정에서 과학자들은 실험이 어떠한 이상조건을 만족해야 하는지를 결정해야 한다.

3) 실제 세계에 근접하기 위한 이상조건 수정과 제거

이상화된 물리 세계로부터 실제 세계를 바라다 보면 물리 세계가 예측하는 것과 다른 경우가 있게 되고, 이러한 격차는 이상조건을 통해 설명하게 된다. 그러나, 이상화된 물리 세계와 실제 세계와의 격차에 대한 문제는 왜 그러한 격차가 생기게 되었는지에 대한 설명만으로는 부족하다. 특히, 실제 세계에 대한 보다 더 정밀한 설명을 하려고 하면 할수록 이러한 격차는 더욱 더 커지게 되고, 결국은 그러한 격차를 줄여야 할 심각한 필요성에 당면하게 된다. 이러한 경우에 과학자의 작업 중의 하나는 이상화된 물리 세계를 보다 더 실제 세계에 가깝게 하기 위해 이상조건을 조정하고 제거해 나가는 일이다.

이에 대한 예로는 보어가 원자 모형을 제안하고 개선했던 과정에 대한 라카토스의 설명에서 찾아볼 수 있다.

"그의 첫번째 모델은 원형 궤도를 도는 하나의 전자를 갖고 있는 고정된 양성자핵에 기초를 둔 것이었다. ... 보어의 값들은 고정된 원자핵 주위를 도는 전자에 입각한 대략적인 계산을 근거로 하고 있었다. 그러나, 물론 그 전자는 공통적 중심의 주위를 돈다. 그리고 당연히 이체(two-body) 문제를 다룰 때 행해지는 것처럼 환산질량으로 즉, $m_e' = m_e / (1 + m_e / m_p)$ 으로 대체해야 한다. 이 수정된 모델이 M_3 였다. ... 보어의 연구 프로그램은 그 후 계획된 대로 진행되었다. 다음 단계는 타원궤도들을 계산하는 일이었다. ... 그렇지만 전자들이 원자핵 주위를 고속으로 회전함으로써(만일 아인슈타인의 역학이 참이라면) 전자들이 가속될 때 그 전자들의 질량이 현저히 변해야 한다. 실제로 상대성 이론에 따른 이러한 수정들을 계산함으로써 쪼머펠트는 에너지 준위의 새로운 배열을 얻었고 따라서 스펙트럼의 미세구조를 얻었다."(Lakatos, 1980, p. 61-64)

즉, 보어는 1913년에 발표한 논문에서는 양성자의 운동을 무시하고 전자의 운동도 원운동이라는 이상조건을 사용하였다. 또 전자의 스핀을 고려하지 않은 재료적 이상화도 포함되어 있었다. 그러나 퍼커링과 파울러의 자외선 계열에 대한 반증 사례를 설명하기 위한 과정에서 하나의 궤도를 도는 전자와 두 개의 양성자로 이루어진 모델로 바꾼 후에 다시 원자핵도 질량 중심을 중심으로 운동을 한다는 이체(2-body) 문제로 조절하였다. 그리

고 1915년 쪼머펠트에 의해 전자의 운동이 타원궤도를 돈다는 수정을 하면서 아인슈타인의 이론에 따라 전자의 질량이 정지 질량과 같지 않으며 상대론적 효과에 의해 증가한다는 수정을 함으로써 1891년에 마이켈슨에 의해 발견되었던 수소스펙트럼의 이중성을 설명할 수 있게 되었다. 이 외에도 전자의 스핀을 고려하면서 점차로 보어의 원자모형은 보다 많은 실제 현상들을 설명할 수 있게 되었다.

이와 같이 이상조건이 포함된 많은 물리법칙과 물리적인 해(solution)가 계속적인 이상조건들의 수정과 제거를 통해 보다 더 정밀해지고 세련되어 지는 예는 보어의 경우 이외에도 과학사에서 많이 찾아볼 수 있다.

III. 요약 및 결론

본 논문에서는 이상화의 의미와 특성에 대한 일반적 논의의 주를 하였다. 논의된 내용을 요약하면 Fig. 7과 같다.

갈릴레오에 의해 도입되어 근대 물리학의 특성을 규정짓게 한 이상화는 여러가지 유형이 있음을 알 수 있다. Fig. 7에서 보듯이 변인을 무시하거나, 변인의 특성을 기술하지 않거나, 극한 상황을 다루거나, 특정 변인들이 일정하거나 균일하다고 하는 등의 가정을 할 때

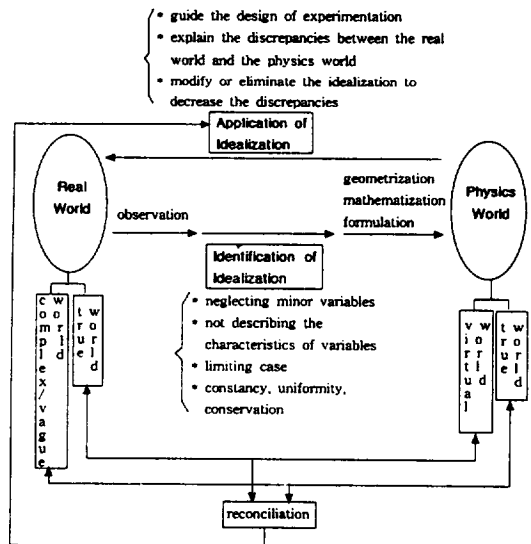


Fig. 7 The meaning and the characteristics of Idealization

모두 이상조건이 사용된다. 이러한 이상조건의 설정은 특히 발견의 상황에서 중요한 역할을 한다. 즉, 실제 세계로부터 얻을 수 있는 감각정보들로부터 직접 모델과 법칙이 나오지 않고 이상화의 설정을 통해서 모델과 법칙이 만들어지고, 이들을 기하학화하고 수식화하거나 형식화함으로써 물리세계가 구축되게 된다는 것이다. 이러한 이상화의 설정이 결국은 실제 세계에 대한 근사일 뿐이라는 지적은 실제 세계와 물리 세계와의 관계에 대한 철학적 질문을 야기시킨다. 즉, 실제 세계를 참으로 보고 물리 세계가 근사라는 입장과, 반대로 물리 세계가 참이고 실제 세계가 복잡하고 흐린 세계라는 입장에 대한 결정이 쉽지 않다는 것이다. 이에 대해 물리학자들은 이러한 문제에 대한 해결을 다르게 접근한다는 점을 언급하였다. 즉, 실제 세계와 물리 세계와의 격차가 어떻게 생긴 것인지를 설명하거나 그러한 격차를 줄이기 위해 이상조건을 조정하거나 제거하는 노력을 하게 된다. 이러한 노력 속에서 실험은 또 다른 의미를 갖게 되는데, 바로 실제 세계에 대한 규정적인 역할로서 실험이 수행될 수 있다는 것이다. 즉, 물리 세계가 어떠한 조건을 만족할 때 실제 세계에서 구현될 수 있는지를 이상조건이 말해주므로써, 실험이 바로 그러한 이상조건에 근접하도록 설계되기도 한다는 것이다.

이상조건은 물리활동에서 거의 항상 포함되어 있다고 해도 과언이 아니다. 그러나 그에 대한 관심과 연구가 많지 않았던 것도 사실이다. 더구나 이러한 이상조건의 의미와 특성에 대한 논의가 학생의 물리학습에 어떠한 시사점을 줄 수 있는지에 대한 연구 또한 필요하다고 하겠다. 앞서 언급하였듯이, 본 연구는 이상조건에 대한 학생과 교사의 이해를 조사하기 위한 연구의 시작이다. 따라서, 본 연구에 뒤이어 이상조건이 물리학습에 주는 시사점을 좀 더 구체적으로 알아 볼 것이며, 그러한 이론적 논의들에 기초하여 실제로 학생과 교사들이 이상조건에 대해 어떻게 이해하고 있는지를 조사하게 될 것이다.

적 요

본 연구에서는 이상화의 의미와 특성에 대한 논의를 통해 이상화에 대한 학생과 교사의 이해를 조사하기 위한 이론적 기반을 제공하고자 한다. 갈릴레오에 의해 도입되어 근대물리학의 특성을 규정짓게 한 이상화는 네 가지 방법에 의해 설정된다: 특정 변인을 무시하거나, 변인의 특성을 기술하지 않거나, 극한 상황을 가정하거나,

나, 일정 또는 균일하다고 하는 방법. 이러한 방법을 통해 설정된 이상화는 실제 세계에 대한 감각정보로부터 모델과 법칙을 만들고, 이것을 수식화하고 형식화함으로써 물리 세계를 구축하는 발견의 맥락에서 중요한 역할을 하게 된다. 물리세계가 이상조건의 설정을 통해 구축된다는 관점은 물리 세계가 실제 세계에 대한 근사일 뿐이라는 관점을 갖게 하며, 이러한 관점은 실제에 대한 철학적 문제를 야기시키기도 한다. 또한 물리 세계로부터 실제 세계를 설명하고 이해하는 과정에서도 이상화는 중요한 역할을 하게 된다. 즉, 물리학자들은 물리 세계와 실제 세계와의 격차를 인정하고 그러한 격차를 설명하고 나아가 격차를 좁히기 위한 끝없는 노력을 하게 되는데, 이때 물리학자들은 물리세계에서 설정되었던 이상화를 조정하거나 제거하는 활동을 하게 된다. 본 연구에 뒤이어, 이상화가 물리학습에 주는 시사점에 대한 논의와 실제 학생과 교사의 이상화에 대한 이해조사가 계속될 것이다.

참 고 문 헌

- 공구영, 이보열, 최남홍, 권영환, 오수량.(1987). 고등학교 물리Ⅱ. 서울: 한서출판사.
- Arons, B. A.(1990). *A guide to introductory physics teaching*. New York: John Wiley & Sons.
- Choi, J. S., & Song, J.(1996). Students' preference for different contexts for learning science. *Research in Science Education*, 26(3), 341-352.
- Einstein, A.(1954). *Ideals and opinions*(On the method of theoretical physics), (p. 271). Wings Books: New York.(1933년 6월 10일 옥스퍼드에서 행한 강연에서)
- Finicchiaro, M. A.(1997). *Galileo on the world systems: A new a bridged translation and guide*. California: University of California Press.
- Garrison, J. W.(1986). Husserl, Galileo, and the processes of idealization. *Syntheses*, 66, 329-338.
- Halloday, 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.
- Krajewski, W.(1982). *Polosh essays in the philos-*

- ophy of the natural sciences. Dordrecht: Reidel.
- Lakatos, I.(1980). The methodology of scientific research programmes. New York: Cambridge University Press.
- Laymon, R.(1985). Idealizations and the testing of theories by experimentation. in P. Achinstein & O. Hannaway(eds.), *Observation, experiment and hypothesis in modern physical science*(pp. 147-173). Cambridge: MIT Press.
- 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 international 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.
- Strike, K. A., & Posner, G. J.(1992). A revisionist theory of conceptual change. in R. A. Duschl and R. J. Hamilton(eds.), *Philosophy of science, cognitive psychology, and educational theory and practice*(pp. 147-176). Albany: State University of New York Press.
- Schecker, H. P.(1992). Pragmatic change in mechanics: Implications of historical processes for physics education. *Science & Education, 1*(1), 71-76.
- Song, J., & Choi, J. S.(1994). Students' preference on different contexts in learning basic concepts of mechanics. 한국 물리학회, *물리교육*, 12(2), 82-87.
- Solomon, J.(1983). Learning about energy: How pupils think in two domains. *European Journal of Science Education, 5*(1), 49-59.
- Wagenschein, M.(1988). *Naturphänomene sehen und verstehen-genetische lehrgaenge*. Klett, Stuttgart.