

科學教育, 14, 93~114, 1997  
Journal of Science education  
14, 93~114, 1997

## 科學史的 學習指導

-새로운 과학 학습지도법의 제안-

김규용\* · 양승훈\*\*

## Historical Teaching of Science

-Propose a Method for Teaching Science-

Kim, Kyu-Yong · Yang, Seung-Hun

### Abstract

We suggest the possibility of "historical teaching" as an effective strategy for teaching science in classroom. At first, we survey the historical background for historical teaching of science, and then present the possible merits of introducing the history of science into science class: (1) to overcome the misconceptions of students in science; (2) to bridge science and other disciplines; (3) to understand the social aspects of science; (4) to understand the nature of science and scientific method, etc. Finally, we present briefly the some limits of historical teaching.

---

본고는 과학사와 과학교육(양승훈 외, 민음사, 1996)의 제 1단원에 실린 내용을 제주대학교 과학교육 연구소 심포지움을 위해 다소 수정 보완한 것임.

\* 제주대학교 사범대학 과학교육과 교수

\*\* 경북대학교 사범대학 물리교육과 교수

## I. 서론

R.A. Duschl 에 의하면 오늘날 초, 중등 과학교과에서는 대부분 검증의 맥락(context of testing) 과 관련된 내용들이 주종을 이루며 어떻게 인간이 현재의 인식에 도달했는지에 대한 발견의 맥락이 무시되고 있다고 한다. 그는 발견의 맥락에 해당하는 과학교육을 <과학에 관한 지식의 교육>(knowledge-about-science-teaching) 이라고 부르며 정당화의 맥락에 해당하는 과학교육을 <과학적 지식의 교육>(scientific-knowledge teaching) 이라고 부르면서 前者 즉, 현재의 인식에 이르게 된 추리의 고리가 무시되었기 때문에 교사들과 학생들은 불완전한 지식을 갖게 되었다고 주장한다. 그래서 두실은 오늘날 과학교육에서 지식의 구조, 과학적 추리의 과정, 실험결과의 분석방법, 과학이론을 평가하는 기준 등이 학생들의 학습심리나 구체적인 수업계획과 결부되어야 한다고 주장하였다.<sup>1)</sup>

이러한 논의는 과학사와 과학철학과 관련된 내용이므로 최근에는 과학교육에서 과학사가들과 과학철학자들의 연구결과를 도입하려는 노력들이 일어나고 있다. 이러한 노력은 이미 1916년에 John Dewey 가 민주주의와 교육이라는 자신의 저서에서 과학적 방법론의 熟知가 과학적 지식의 획득보다 중요하다고 역설한 데서부터 나타났지만<sup>2)</sup> 과학교육계에서 본격적인 시도가 이루어진 것은 극히 최근의 일이라고 할 수 있다.

여기에서는 과학교육에서 과학사와 과학철학 (History and Philosophy of Science, HPS)을 도입하려고 하는 최근의 노력들을 소개하고 교과과정과 교과지도에서 과학이론의 구조와 발달과정이 어떤 역할을 하는지 알아본다. 끝으로 과학사를 과학교육 현장에 구체적으로 어떻게 도입될 수 있는지에 대한 몇몇 예를 살펴본다.

## II. 역사적 개관

역사적으로 과학교육을 과학사나 과학철학과 관련지으려는 노력은 19세기 중엽부터 있었다. 1855년, Glasgow 에서 모인 영국과학진흥협회 (British Association for the Advancement of Science . BAAS) 회의에서 총재인 Argyll 공은 과학교

육에서는 <단순한 결과는 물론 과학의 방법, 무엇보다도 과학사>를 가르쳐야 함을 역설하였다. 역사상 이루어진 다른 과학자들의 노력들을 이해함으로써 학생들은 수많은 오류의 가능성 속에서도 진리를 인지할 수 있도록 준비될 수 있다는 것이다.<sup>3)</sup> 과학사는 학생들에게 안정되고 믿을 만한 과학지식을 전달하면서도 과학적 지식의 가변성을 가르쳐야 하는 과학교육의 목표를 달성하기 위해 유용하게 사용될 수 있다.<sup>4)</sup>

아질은 일차 세계대전과 관련하여 1918년, BAAS모임에서도 과학이 생기충만하고 매마르지 않게 되려면 과학교육에서 과학사를 통해 역사의 교훈을 가르쳐야 한다고 강조하였다. 과학사와 과학자들의 전기는 학생들로 하여금 실험을 통해 얻을 수 없는 과학에 대한 포괄적인 견해를 갖게 해준다고 하였다.<sup>5)</sup>

이러한 노력은 유럽 대륙에서도 있었다. 물리학자요 철학자였던 Ernst Mach 는 500여편의 다양한 글들을 통하여 상대론의 탄생에 중요한 영향을 끼치는 등 물리학에서 수많은 업적들을 남겼을 뿐아니라 소위 빈 학파 (Wiener Kreis) 라는 논리실증주의 운동의 탄생에 결정적인 영향을 미치는 등 철학 및 과학철학에서의 업적을 남겼다. 마하의 업적은 과학과 철학 영역에만 머물지 않고 과학교육의 이론 및 실제에서도 중요한 업적을 남겼다.<sup>6)</sup>

과학교육에 대한 마하의 아이디어는 단순하지만 날카롭다. <확실한 자료를 갖고 출발하고 학생들이 토의하는 내용과 철저히 익숙해지도록 하라; 주제를 잘 이해하게 하라; 적게 가르치더라도 잘 가르쳐라; 주제의 발달에 대한 역사적 순서를 따라가라; 학생들의 지적 수준과 능력에 맞도록 학습내용을 조절하라; 과학이 설명하는, 그리고 과학에서 일어나는 철학적 질문들을 말하라; ... 학습자의 마음을 사용하라(engage.)><sup>7)</sup>

또한 학습내용을 역사적 발전순서에 따라서 가르거나 그것의 소위 <기원론적 접근>(genetic approach) 즉 그것이 생겨난 기원을 가르침으로써 학습내용을 전달하는 방법을 제안하기도 하였다. 그가 기원론적 접근을 강조한 이유는 다음과 같다. 먼저, 한 과학적 사실의 논리는 그것을 가르치는 논리와 반드시 같지는 않다. 다음에는, 기원론적 접근을 통해 과학의 오류가능성과 역사성을 가르칠 수 있음을 믿었기 때문이다. 실제로 마하는 열물리(1869), 역학(1883), 광학(1922)에 관한 그의 主著에서 기원론적 접근을 시도하였다.<sup>8)</sup>

마하 자신의 많은 물리학적 발견들도 이전 물리학자들의 발견과정으로부터 시사 받은 바가 컸음을 시인하고 있다. 그는 <여기서 내 아이디어는 갈릴레오, 호이

헨스, 뉴턴 등의 저서들로부터 적절하게 고른 것이다 ... 학생들은 그 내용들을 토의할 수 있으며 최초의 실험들도 해볼 수 있다>고 했으며<sup>9)</sup>, 또한 그는 <과학연구의 중흥기의 고전적 저자들을 접촉함으로써 무한한 기쁨과 철저하고도, 지속적으로 대체할 수 없는 교훈, ... 그리고 넓은 마음(cosmopolitan openness)을 얻을 수 있으며 ... (이는) 이 시대의 과학을 특징짓는다>고 하였다<sup>10)</sup>.

물론 마하의 기원론적 방법은 과학사 그 자체를 옹호한 것은 아니다. 그 자신 과학사가이면서도 科學史가 과학을 대치해서는 안되며 과학사는 어디까지나 과학을 더 잘 이해하고 가르치는 도구이지 그 자체가 목적이 아님을 분명히 했다. <많은 연대나 사람이름을 열거함으로써가 아니라 기원론적 제시를 통해 역사적 사실(moment)은 의미를 갖게 된다.><sup>11)</sup>

철학적으로 마하는 반실재론자, 경험론자이며 실증주의적 인식론의 옹호자였기 때문에 특히 과학적 개념의 잠정적(provisional), 도구적 기능을 강조하였다. 그는 과학교육에서 과학지식의 철학적 기초의 중요성을 인식하였다. 그래서 과학교육의 모든 영역에서 기초적인 존재론적, 인식론적 논의를 포함시켜야 한다고 주장하면서 과학분야의 박사학위 후보자들이 자신들의 전공분야에 대한 철학적 지식이 없음을 개탄하였다: <때로 박사학위 후보자들이 그들 자신의 전공분야에 관한 철학적 글들을 몰랐던 것이 분명하게 되었다.><sup>12)</sup>

마하 이후 20세기에 들어와서도 과학교육에서 HPS의 중요성은 끊임없이 제기되었다. 화학자 출신의 저명한 교육자 James B. Conant는 일반인들에게 과학을 가르치는 지름길은 과학사를 통해서 가르치는 것이라고 주장했다. 그는 과학사, 특히 사례사를 통한 과학학습은 <과학의 전략과 전술>(tactics and strategies of science)을 배울 수 있는 잇점이 있다고 지적했다. 또한 물리학의 지나친 전문화를 극복하는 수단으로서 과학사의 중요성을 강조한 물리학자 Gerald Holton은 전통적인 물리 학습이 물리학과 다른 학문 분야들 사이의 관련성을 무시함으로써 물리학의 진면목을 보여주지 못했다고 주장했다. 또한 노벨물리학상 수상자인 I.I. Rabi도 과학은 역사적, 사회적, 인간적인 이해를 고려에 넣고 가르쳐야 한다고 주장하였다. 이 밖에도 과학교육에서 과학사의 중요성은 Dewey, Nunn, J.J. Schwab 등에 의해 끊임없이 지적되었다.<sup>13)</sup>

이러한 선각자들의 제안은 부분적으로나마 열매를 맺는 듯이 보였다. <하버드 프로젝트 물리>(Harvard Project Physics, HPP)나 BSCS <생명의 망>(Web of Life) 코스 등은 과학교육학자들이 과학사가들, 과학철학자들과 협력하여 만든 대

표적인 예라고 할 수 있다. 그러나 과학교육과정의 대대적인 개혁이 단행되었던 1960년대 미국과 영국의 중등 과학교육에서는 과학의 역사적, 철학적 요소가 거의 제외되었다. 이는 스푸트니크 충격 (Sputnik Shock)으로 인해 소련에 상대적으로 뒤떨어진 과학내용의 전수를 우선해야 한다는 일종의 위기감이 작용했기 때문이다.

물론 스푸트니크 충격 이후 지난 30여년 동안에도 과학교육에서 좁은 과학지식만을 가르치는 데 대한 비판은 끊임없이 제기되었다. 이러한 비판은 개인적으로 뿐 아니라<sup>14)</sup> 영향력 있는 단체들에 의해서도 제기되었다.<sup>15)</sup> 그러나 이러한 논의가 좀 더 체계적으로 대두된 것은 지난 십년 이내였다고 할 수 있다. 영미를 중심으로 서구에서 일어나고 있는 최근 과학교육 개혁운동은 HPS를 과학교육의 중요한 부분으로 도입해야 함을 강조하고 있다.

그러면 왜 이러한 운동이 새롭게 일어나고 있는가? 여기에는 여러 가지 이유를 생각할 수 있을 것이나 무엇보다 과학의 성장과정과 과학적 지식의 구조를 고려하지 않고 오로지 과학적 지식의 전수만을 강조한 지난 20여년 간의 과학교육이 과학의 사회적 측면은 말할 것도 없고 과학적 지식의 전수라는 면에서조차 성공적이지 못했음이 드러나고 있기 때문이다.

이처럼 과학교육에서 과학사의 유용성에 대한 인식전환으로 인해 1990년대에 들어와 미국과 영국을 중심으로 HPS 관련 토론회들을 과학교육에 삽입하려는 노력이 활발하게 일어나고 있다. 이미 영국의 영국과학교과과정 (British National Science Curriculum, BNSC)에서는 HPS가 교과과정에 약 5%를 차지하고 있으며,<sup>16)</sup> 미국의 과학교육 개혁에 관한 보고서인 U.S. Project 2061에서도 과학교육에서 HPS의 삽입을 강력히 추천하고 있다.<sup>17)</sup> 이 두 보고서 모두 학생들은 과학철학과 과학의 특성을 배워야 하며 이를 위해서는 과학사, 과학과 문화의 상호관계, 인간의 인지과정, 합리성의 기준 등을 배워야 한다고 강조한다.<sup>18)</sup> 덴마크에서는 아예 새로운 물리 교과과정의 일부를 역사적 맥락을 따라 만들고 있다.<sup>19)</sup>

이 밖에도 미국과학재단 (National Science Foundation, NSF) 의 지원으로 1987년에 시작된 <The History and Philosophy of Science and Science Teaching>이라는 국제적인 프로젝트에서는 과학교사, 과학자, 역사가, 철학자, 교육행정가들을 한데 모아 국제학술회의를 개최하고 과학교육에서 HPS를 도입하는 실제적인 전략을 수립하고 있다. 이 프로젝트의 일환으로 여섯 개의 학술잡지들이 특별호를 발행하여 이 주제를 다루었다.<sup>20)</sup> 유럽물리학회 (The European Physical Society)

에서는 1983년이래 매 2년마다 물리학과 물리교육에 관한 학술회의를 개최하고 있으며, 뮌헨의 독일 박물관 (Deutsches Museum)에서는 科學史上 유명한 실험들을 재현하여 과학교육 현장에서 사용할 수 있도록 하고 있다. 미국과 영국에서도 과학사학회를 중심으로 비슷한 사업을 하고 있으며, 특히 NSF에서는 HPS를 과학교육과 역사교육 교과과정에 도입하도록 장려하는 대규모 사업을 하고 있다. 이 밖에도 과학-기술-사회 (Science-Technology-Society, STS) 강좌와 관련하여 미국의 여러 주에서는 HPS를 과학교육에 여러 가지 모습으로 도입하고 있다.

우리 나라에서 과학사를 과학교육에 도입해야 한다는 목소리는 과학사가인 송상용 교수에 의해 처음으로 제기되었다. 간단한 제안 정도이긴 하지만 그는 과학에 별 흥미가 없는 인문·사회과학계 학생들에게 현대과학을 가르칠 수 있는 방안으로서 <어떤 과학적 결과가 나온 여러 단계를 다시 더듬어 보는 歷史的方法과 결과를 분석해서 그 구조적 패턴과 구성성분 사이의 논리적 관계를 드러내는 論理的方法>을 제시하였다. 그는 과학사를 현대과학과 관련지워 가르치면 학생들이 과학에 관한 흥미를 되찾는 것과 더불어 자신의 전공분야와의 관련 속에서 새로운 통찰력을 얻을 수 있을 것이라고 하였다. 또한 이러한 과학사를 과학철학과 관련시켜 현대과학을 가르치면 과학은 낡은 과학의 회고에만 그치지 않고 과학의 개념적 구조와 과학연구의 방법을 이해할 수 있을 것이라고 하였다. 구체적으로 그는 교양으로서의 과학교육은 과학사를 위주로 하고 과학철학과 현대과학을 중심으로 포함하는 것이 이상적임을 제안하였다.<sup>22)</sup>

그러나 과학사를 과학교육에 도입하는 것은 단순한 제안이나 당위성이나 필요성의 주장만으로는 불가능하다. 구체적으로 어떻게 과학사를 과학교육에 도입할 수 있을 것인가에 대한 구체적 전략이 필요하다. 최근 필자가 펴낸 물리학과 역사는 물리학사를 실제로 물리학을 가르치는 방법으로 도입한 실제적인 시도라고 할 수 있다. 이 책에서는 역학, 열역학, 전자기학, 광학, 현대물리학 등의 분야에서 주요한 개념들 21개를 선택하여 이들의 성립과정을 설명하면서 이들의 물리적 개념을 제시하고 있다. 각 장의 끝에는 실제적으로 과학사적 학습지도가 가능하도록 학습지도안을 첨부하였기 때문에 고등학교 물리나 대학의 교양물리학을 역사적 접근을 통해 가르칠 수 있도록 하고 있다.<sup>23)</sup>

그러면 구체적으로 HPS의 어떤 내용을 어떻게 과학교육에 도입할 수 있을 것인가? 이를 위해 아래에서는 먼저 최근의 과학철학적 흐름과 과학교육의 관계를

살펴보고자 한다. 이는 과학철학은 과학사에서의 수많은 발견과 발명들에 대한 인식론적 기초를 제공하기 때문이다. 아래에서는 특히 1950년대 이후 등장하여 종래의 과학관의 변화를 촉구하는 <새로운 과학철학> 운동을 중심으로 살펴보고자 한다.

### Ⅲ. 과학교육과 과학사

그러면 과학사는 과학교육에서 어떻게 사용될 수 있을까? 과학사는 과학교육에 암묵적으로도 사용될 수 있고 명시적으로도 사용될 수 있다. Leonardo Sanchez는 과학교육에서 과학사는 교과과정 설계와 수업현장에서 암묵적으로 사용되는 것이 바람직하다는 주장을 하면서 이의 두가지 예를 제시한다.<sup>24)</sup>

다음으로는 과학사를 명시적으로 수업시간에 도입하는 경우를 생각해 볼 수 있다. 수업 현장에서 교사에 의해 를 과학수업에 도입하기 위해서 교사는 먼저 수업의 어떤 부분에 과학사를 도입할 수 있을지를 결정해야 한다. 과학학습 내용 중에는 과학사를 수업에 사용하기에 적합한 주제가 있는가 하면 어떤 것은 그렇지 않기 때문이다. 또한 어떤 주제는 수업 시작하는 도입 단계에서, 어떤 주제는 수업 전개 단계에서, 어떤 주제는 수업을 정리하는 단계에서 과학사를 사용하는 게 유익하다. 도입 단계에서 과학사를 사용할 때는 강의 내용에 대한 학생들의 동기와 흥미를 유발시키는 데 유익한 전기적 일화나 과학적 업적이 출현하게 된 당시의 사회적 배경 등을 소개하는 것이 적합할 것이다. 오개념 교정이나 개념의 심화학습을 위해서는 전개부분에서 그 개념에 이르기까지 과학자들의 과정을 추적하게 하는 것이 바람직할 것이다. 이 때는 과학적 업적이 출현하기까지의 시행착오, 시행착오의 원인규명 등 구체적인 연구과정이 소개되어야 할 것이다. 결론 부분에서는 주로 과학에 대한 인간의 책임이나 과학의 사회적 영향, 과학과 인간의 관계, 바람직한 과학관 등을 정리하기 위해 과학사를 사용할 수 있을 것이다.<sup>25)</sup>

아래에서는 과학사의 도입이 물리교육에 구체적으로 어떤 유익을 줄 수 있는지 몇 가지 예들을 중심으로 살펴보고자 한다.<sup>26)</sup>

### 1. 과학의 다양한 측면

먼저 우리는 과학사가 과학의 다양한 측면을 가르치는 데 중요한 역할을 할 수 있음을 들 수 있다. 과학은 한편으로는 사람들에 의해 생성된 사회적 산물이며 다른 한편으로는 역사적 산물이다. 과학의 사회적 측면에 대한 대표적인 예로는 갈릴레오의 태양중심설 재판울 들 수 있다. 지금까지 로마 교황청이 태양중심설과 관련하여 갈릴레오를 재판하고 징죄한 사건은 종교와 과학의 갈등에 대한 고전적인 예라고 인식되어 왔으나 최근 연구의 결과는 전혀 다른 면을 보여주고 있다. 즉 갈릴레오 재판은 갈릴레오의 논쟁적 성격과 더불어 당시 사회의 종교적, 정치적 진보세력과 보수세력 사이의 갈등 때문에 야기되었다는 것이다. 이런 결론은 교황청에 있는 당시 재판기록을 면밀히 분석한 Santillana의 연구에서 나온 것으로 매우 설득력이 있다.<sup>27)</sup> 그래서 최근에는 과학혁명 전체를 재해석하려는 움직임이 활발하다.<sup>28)</sup>

또한 과학은 그 시대의 사회적 산물임과 동시에 문화적 산물이다. 한 예로 19세기 전자기학의 등장은 19세기 문화적인 조류였던 낭만주의 기풍과 무관하지 않다. 직접적인 접촉에 의해서만 모든 것이 일어난다는 기계론적 뉴턴 철학과는 달리 <감정의 移入> 혹은 <느낌> (feeling)을 강조한 낭만주의는 19세기 전반 유럽의 모든 분야에 영향을 미쳤다. 문학, 음악, 철학, 사회는 물론 과학에까지 영향을 미쳤다. 원격작용 (action-at-a-distance)에 근거한 전자기학, 진화론이나 세포설 등은 여러 면에서 낭만주의적인 기풍을 지녔기 때문에 과학사자들은 이들을 낭만주의 과학으로 분류한다.

역사적인 教授는 과학과 시대정신, 과학과 사회의 다른 유관한 분야들과의 관련성을 지위중으로써 전체적인 과학의 직조구조 속에서 현재 자신이 공부하고 있는 분야의 자리매김 작업을 도와줄 수 있다. 한 예로 18, 19세기에 등장한 열역학은 산업혁명으로 인해 곳곳에서 사용되고 있는 열기관(주로 증기기관)의 효율 증대와 밀접한 관계가 있다. 또한 18세기 중반부터 19세기 중반까지 일어난 화학혁명은 이산화탄소, 수소, 산소, 질소 등의 기체발견과 밀접한 관련을 갖고 있다. 이러한 기체 발견으로 인해 플로지스톤설이 부정되게 되었고 이와 더불어 출현한 라부아지에의 현대적인 연소설은 돌튼의 원자론으로, 원자론은 아보가드로와 카니차로의 분자론으로 이어지게 되었다. 이러한 원자에 대한 관심은 19세기 후반, 방사능 발견, 원자구조 해명 따위로 이어져 20세기 원자력 문명이 도래하는 것을 준비하였다.

또 다른 예는 상대론이다. 상대론의 등장은 20세기 초반의 철학 사조와 밀접한 관계가 있다. 흔히 논리실증주의라고 부르는 극단적 실증주의에 대한 반발로 나온 마하의 시공의 절대성 부정은 절대 시간, 절대 공간을 부정하는 상대론의 출현에 대한 근거를 제공하였다. 아이슈타인 자신도 상대론 연구가 마하에게 많은 영향을 받았음을 시인하고 있다.

이 밖에도 망원경의 발명과 발달로 인해 천문학의 향방이 달라졌으며 논쟁에 휘말렸던 뉴턴의 만유인력법칙은 확증되었다. 19세기 말부터 광속에 대한 정밀측정이 가능하게 된 것은 전기사용으로 인해 모터와 전기적 광원을 사용할 수 있게 된 것이 결정적이었다. 생물학에서 19세기, 독일의 M.J. Schleiden 과 T. Schwann 에 의한 세포설은 현미경의 발달의 결과였으며 1865년에 발표된 Gregor Mendel 의 유전법칙은 1859년에 발표된 Charles Darwin 의 종의 기원을 생각지 않고는 이해할 수 없다. 1920년대에 Alfred Wegener 가 제안한 대륙이동설이 1960년대에 다시 부흥하게 된 것은 대륙이 이동한다는 사실을 구체적으로 측정할 수 있는 레이저의 발명을 생각지 않으면 안된다. 20세기 초반 네덜란드의 Kamerlingh Onnes 가 초전도 현상을 발견한 것은 헬륨의 액화가 없었으면 생각할 수 없는 것이었다. 이러한 것들은 특정 과학의 발달이 인근 과학의 발견과 얼마나 밀접하게 관련되어 있는지를 보여주는 몇몇 예들에 불과하다.

## 2 과학적 방법

과학사는 과학철학에서 제기하고 있는 전통적 과학방법론, 즉 귀납법 비판에 대한 역사적 근거를 제공함으로써 바른 과학적 방법론을 제시해 준다. 모든 이론은 관찰 위에 근거한다는 소박한 귀납주의자들의 주장과는 달리 科學史上 많은 중요한 발견들은 이미 이론적으로 예측된 것들을 관찰함으로써 이루어진 것을 볼 수 있다.

예를 들면 해왕성의 발견은 관측이 먼저 이루어진 것이 아니라 이론적 예측이 먼저 이루어진 것이다. 뉴턴의 만유인력법칙과 케플러의 행성운동에 관한 법칙에 근거하여 1846년 천왕성의 섭동으로부터 천문학자들은 천왕성과 명왕성 사이에 미지의 행성이 존재해야 한다고 예측하였다. 이미 이론적으로 미지 행성의 크기, 질량, 궤도 등도 알려진 상태에서 충분히 정밀한 망원경의 출현만을 기다리고 있었다. 때가 되어 적절한 망원경이 개발되자 예측한 바와 같이 해왕성은 발견되었다.

일정성분비의 법칙도 먼저 실험을 통해 증명된 것이 아니라 물질은 작은 입자로 구성되어 있으리라는 입자론적 선입견에 근거하여 발견되었다. 돌튼은 만일 물질의 최소단위가 더 이상 쪼갤 수 없는 입자라고 한다면 이러한 입자들이 다른 물질들과 결합하는 데는 일정한 비가 있을 것이라고 가정하였다. 이러한 선입견에서 시작하여 산소와 탄소의 결합실험을 한 결과 탄소가 산소와 결합하는 몇 종류의 비율이 있는데 이 비율들은 정수비임을 발견한 것이다. 사실 원소들끼리 결합하는데는 어떤 일정한 비율이 있다는 것은 오래 전부터 관찰되어 왔으나 물질의 입자설(혹은 원자설)이라는 전제의 안경을 통한 관찰이 이루어지기까지는 과학적 사실이 되지 못했다.

상대성 원리의 증명도 귀납법을 따르지 않은 중요한 예라고 생각된다. 금세기 초, 특수상대론과 일반상대론이 발표되었을 때는 많은 사람들이 믿지 못했다. 그러나 후에 상대론의 검증을 위해 상대론에서 예측하고 있는, 개기일식 때 별빛이 실제로 태양근처에서 휘는 현상을 관측한 후 비로소 상대론은 받아들여지게 된 것이다.

현대의 입자물리학도 귀납적 추리를 따르지 않는 고전적 예이다. 새로운 소립자를 찾으려는 노력은 무작위로 이루어지지 않을 뿐 아니라 관찰이 선행되지도 않는다. 대부분의 실험들은 이미 자연의 대칭성이나 통일성과 같은 근본적인 규칙성에서 출발하여 아직 관찰되지는 않았지만 있으리라고 예측되는 미지의 입자를 찾는 것이다. 한 예로 중간자의 발견은 실험적으로 이를 관찰하기 오래 전에 유키와 히데키 楊川秀樹 등에 의해 이미 이론적으로 예언된 것이며 최근 톱쿼크 top quark 와 같은 새로운 입자들의 발견도 면밀한 이론적 예측 위에서 이루어진 것들이 대부분이다. 현재 새로운 입자를 찾으려는 사람들도 이미 이론적으로 예측되는 것들을 찾으려고 노력하는 것이다. 이러한 科學史의 예들은 과학교사들이 전통적 귀납법의 신념을 포기할 것을 시사해준다.

### 3 개념학습

과학사가 어려운 과학적 개념을 가르치는 데 효과적이라는 주장은 여러 사람들에게 의해 지적되었다. 과학사는 학생들에게 현재의 과학적 개념들이 어떻게 발달해 왔는지를 이해하게 할 뿐아니라 정말 중요한 과학적 개념이 어떤 것인지, 학습내용의 계열성은 어떠한지를 말해줄 수 있다. 선대 과학자들이 과학적 발견이나 개념에 이르기까지 겪었던 다양한 경험들과 이들이 사용했던 논리적인 과정

을 추적하는 과정에서 학생들은 좀 더 생생하게 과학적 사실들을 배울 수 있으며 또한 개념학습을 할 수 있는 것이다. 또한 역사를 통해 학생들은 과학적 진리의 뿌리를 알 수 있으며 과학에 대한 이전 사람들의 조망을 이해함으로써 학생들은 현재 이론들이 앞으로 어떻게 변화, 발전해 갈 수 있는지를 알 수 있다. 그리고 과학에 대한 여러 다른 견해를 접하면서 학생들은 과학적 이론에 적용할 수 있는 <바른 혹은 그른> (right and wrong) 개념보다 <유용한 혹은 덜 유용한> (useful and less useful) 개념이 있음을 볼 수 있게 될 것이며, 나아가 역사를 통한 이전 과학자들과의 대화는 학생들이 가진 과학적 개념의 간격 (conceptual gap) 을 메꾸는 역할을 할 수 있다.<sup>29)</sup>

Brian R. McClain 은 실제로 역사적 관점에서 지질학의 원리들과 분자생물학의 기초를 가르치는 것의 유익과 장점을 다음과 같이 요약했다:

<학생들이 (1) 논리를 생각할 기회를 갖는다; (2) 깊이 있게 주제를 다룬다; (3) 고정관념을 줄이고 과학의 메카니즘과 과정을 이해한다; (4) 과학사와 자신들의 마음 속에 있는 오개념을 추적할 수 있다.><sup>30)</sup>

맥클레인이 지적한 바와 같이 개념학습과 관련하여 역사적 교수법은 특히 학생들의 오개념을 교정하는 데 시사해 주는 바가 있다. 지난 수년간 집중적인 연구가 이루어진 誤概念 분야의 연구들을 살펴보자. 이 연구결과들에 의하면 중등학교 학생들은 물론 대학의 과학분야 전공 학생들도 상당한 관성을 가진 오개념을 갖고 있으며 특히 이러한 오개념은 강의실 바깥에서 과학적 인지를 할 때 두드러진다는 것이다.<sup>31)</sup> 이러한 오개념들은 대체로 학생들이 교실에서 공식적인 학습을 하기 오래 전에 일상 경험들을 통해 습득된 것으로 최근 과학적 지식과 상치되는데도 불구하고 학습에 의해 쉽게 교정되지 않는다는 특성을 가지고 있다.<sup>32)</sup>

Jack Lochhead 등에 의하면 이러한 오개념과 正概念 사이의 간극은 과학교육에 과학사를 도입함으로써 어느 정도 극복될 수 있다. 과거에 살았던 중요한 과학자들이 현대의 정개념에 도달하기까지 경험했던 다양한 견해들은 정개념과 오개념 사이의 개념적 간격을 메울 수 있다는 것이다. 그는 학생들이 과학사를 통해 현재의 정개념에 대한 뿌리를 알 수 있으므로 과학사는 효과적인 학습의 모든 필요한 요소들을 포함하고 있다고 주장한다. 과거와의 대화는 학생들의 오개념을 예방하기 위해서라기보다 그들이 가지고 있는 개념들을 발견, 숙고하게 하여 결국은 일관성 있는 개념에 이르도록 하는 것을 도울 수 있다.<sup>33)</sup>

구체적인 예를 들자면 최근 역학이나 전자기학에 있어서 학생들이 갖는 오개념의 상당수는 여러 가지 면에서 과학자들이 현대의 바른 과학적 개념에 도달하기 전 단계에 가졌던 오개념과 유사한 부분이 많다. 그러므로 과학자들이 어떻게 오늘날의 정개념에 이르게 되었는지 알 수 있다면 이는 오개념 교정에 관한 정보를 제공해 줄 수 있으리라고 생각된다.

예를 들면 힘의 역사적 개념 변천은 힘에 대한 학생들의 오개념을 교정하는 데 중요한 실마리를 제공할 수 있다. 뉴턴의 운동법칙은 운동을 자연운동, 강제운동으로 나누고 자유낙하체의 속도가 매질의 밀도에 역비례하고 무게에 비례한다고 주장한 Aristoteles로부터 시작하여 7세기 John Philoponos의 Impetus 개념, 아랍의 Avicenna의 Mayle, 임페투스를 속도 $\times$ 질량으로 이해한 Jean Buridan, 수많은 斜面 실험과 자유낙하 실험을 통해 근대적 관성개념을 확립했던 갈릴레오를 거쳐 확립된 것이다.

이러한 발전 과정은 학생들의 오개념 정정과정과 유사한 경우가 있으며 이는 과학사가 학생들의 오개념 교정에 사용될 수 있음을 보여준다. 힘의 개념은 끊임 없이 변천해 왔으며 이러한 힘의 개념 변천은 오늘날 학생들에게 힘의 개념을 가르치는 데 중요한 몇 가지 시사점을 하고 있다. 역사적으로 힘의 개념 발달과정은 오늘날 학생들의 힘에 관한 오개념 변화과정과 여러 가지 점에서 유사하며 이는 오개념 교정에 대한 중요한 실마리를 제공해 주고 있다고 할 수 있다. 이를테면 많은 학생들은 여전히 물체의 낙하속도는 무게에 비례한다고 생각하는데 이는 바로 2400여년 전 아리스토텔레스가 가졌던 것과 같다. 또한 힘은 속도에 비례한다고 하는 오개념도 오늘날 학생들에게서 흔히 볼 수 있는 개념인데 이는 뉴턴 이전까지 사람들이 가졌던 힘에 대한 오개념이었다.<sup>34)</sup>

근대 이전의 사람들이 이처럼 힘에 관한 잘못된 견해를 오랫동안 지속했던 가장 중요한 이유는 그들의 사고가 일상생활에서 경험하는 현상에 근거하고 있기 때문이었다. 이들은 모든 운동에는 온갖 종류의 마찰력이 작용하고 있다는 사실을 간과했던 것이다. 마찰력의 존재로 인하여 무거운 물체는 가벼운 물체보다 빨리 떨어지며 힘은 가속도가 아닌, 속도에 비례하는 것이다. 그러므로 오늘날 학생들이 가지고 있는 힘에 관한 오개념은 마찰에 대한 학생들의 개념을 교정해 줌으로써 시작되어야 할 것이다. 이처럼 뉴턴의 힘에 대한 생각을 현대 과학사자들이 연구함으로써 힘에 대한 물리적 개념 분석과 역사적 발전과정을 이해할 수 있게 된 것이다.<sup>35)</sup>

둘째 예로는 역학과 전자기의 기본 개념인 場과 力線을 들 수 있다. 뉴턴은 근본적으로 모든 작용은 접촉에 의해 일어난다는 입자철학을 믿고 있었으며 이러한 철학은 중세학자들 사이에서 보편적으로 받아들여지던 바였다. 많은 중세과학자들이 주장하던 물체의 운동에 대한 임페투스 이론도 결국 입자철학과 맥을 같이한다. 입자철학에 의하면 모든 작용은 단단한 입자들의 매개에 의해 일어나므로 어느 한쪽의 작용은 시간적 지연없이 순간적으로 다른 쪽의 반작용으로 나타난다고 생각하였다. 이러한 생각이 뉴턴이 작용-반작용 법칙에서는 별 무리가 없었으나 중력이론에서는 심각한 도전을 받게 되었다. 이는 중력이론에서는 입자철학과 배치되는 소위 원격작용을 인정하지 않을 수 없었기 때문이다. 뉴턴은 입자철학적 세계관에 살면서도 중력이론에서 원격작용을 인정해야하는 딜레마를 벗어 날 수가 없었다.

이러한 뉴턴의 딜레마는 150여년 뒤 패러데이에 이르러 전자기학의 실험에서 다시 나타나게 되었다. 하나의 대전된 입자가 다른 대전된 입자에 미치는 힘은 순간적이 아니라 어느 정도 시간간격이 있음이 관찰된 것이다. 전지를 통해 두 입자들을 대전시킬 때 순간적인 상호작용이 나타나는 것이 아니라 어느 정도 시간간격이 존재하는 것이었다. 이러한 현상은 자기작용에서도 마찬가지였다. 같은 방향으로 전류가 흐르는 두 평행도선 간에는 인력이, 반대 방향으로 전류가 흐르는 도선 사이에는 반발력이 작용하였다. 이 때 전류를 흘리는 것과 도선들 사이에 힘이 작용하는 것 사이에는 어느 정도 시간간격이 존재하였다. 또한 패러데이의 실험은 뉴턴의 운동 제 삼 법칙과도 충돌하였다. 하나의 입자가 다른 입자들에게 힘을 작용할 때, 혹은 하나의 전류가 흐르는 도선이 다른 도선에 힘을 작용할 때 이들 간에는 같은 크기의 작용과 반작용이 존재하는가 하는 질문이 제기되었다.

패러데이는 이러한 현상을 설명하기 위하여 소위 力線(lines of force)이라는 개념을 도입하였다. 이 力線은 빈 공간에서 전자기적 상호작용을 설명할 수 있도록 늘어날 수도, 줄어들 수도, 퍼질 수도, 서로 잡아당길 수도 있었다. 후에 이 力線의 개념은 맥스웰에 의해 場(field)이라는 개념으로 더욱 다듬어졌다.

場은 중등과학이나 대학의 기초물리학 강의에서 학생들이 매우 이해하기 어려운 개념 중의 하나이다. 그러나 이것이 어떤 역사적 맥락 속에서, 무엇을 위해 고안되었으며, 또 어떻게 변천되어 왔는지를 안다면 場의 개념을 이해하는 데 훨씬 도움이 될 것이다.

셋째 예로는 Ampere 의 전자기학 법칙을 들 수 있다. 전류가 흐르는 두 평행도

선 사이의 상호작용을 알기 위해 프랑스의 앙페르는 두 도선의 끝을 전지에 연결하였다. 전지에 연결하자 같은 방향으로 전류가 흐르는 경우에는 인력이, 다른 방향으로 흐르는 경우에는 반발력이 작용하였다. 물론 앙페르는 덴마크의 Oersted의 실험을 통해 이 효과가 전류가 흐름으로써 생기는 動電氣的 자기효과임을 확신하고 있었다. 그러나 단지 도선의 끝을 전지에 연결함으로써 생기는 이 효과가 이미 알려져 있었던 대전체 사이의 정전기적 상호작용과 무엇이 다른지 이해할 수 없었다.

앙페르는 자기가 발견한 이 효과가 정전기적 상호작용이 아닌 새로운 현상임을 증명하기 위한 몇 가지 실험을 하였다.<sup>36)</sup> 우선 같은 전하들 사이에 척력이 작용하는 정전기적 상호작용과는 달리 자신의 실험에서는 이웃한 도선이 같은 극에 연결되어 있을 때 도리어 인력이 작용함을 보여주었다. 또한 정전기적 상호작용에서는 두 도선을 접촉시키는 순간 상호작용이 없어지는 데 반해 자신의 실험에서는 여전히 상호작용이 남아있을 뿐 아니라 이들을 다시 분리하는 데도 여전히 힘이 드는 것을 지적하였다.

오늘날 과학시간에는 170여년 전 앙페르가 자신의 발견이 새로운 것임을 증명하기 위해 기울인 각고의 노력에 대한 언급없이 전류가 흐르는 도선 사이의 상호작용은 동전기적임을 가르치고 있다. 다른 어떤 오류의 가능성도 배제되고 있는 것이다. 만일 교사가 앙페르가 당시의 사람들을 설득하기 위해 노력한 것들을 소개하고 학생들 스스로가 앙페르가 되어 사람들에게 자기의 연구결과가 새로운 것임을 설득할 수 있는 방안을 고안하도록 한다면 학생들이 앙페르 법칙은 물론, 전하나 場의 개념, 다른 전자기적 상호작용 등의 개념을 이해하는데 크게 도움이 될 것이다.

넷째 예로는 Michael Faraday의 전자기 유도 법칙을 들 수 있다. 패러데이의 전자기유도 법칙은 전류의 자기작용을 발견한 외르스테드의 업적에 근거하고 있다. 1820년 외르스테드는 이탈리아 물리학자 Volta가 만든 최초의 축전지에 도선을 연결한 후 전류의 크기를 증감시켜 보았다. 그러자 도선과 평행하게 둔 자침이 전류의 크기에 비례하여 회전함을 발견하였다. 이러한 소식을 들은 패러데이는 1822년부터 자기로부터 전기를 만들려는 실험을 시작하였다. 도선 곁에 자석을 두어보기도 하고 자석의 세기를 변화시켜보기도 하고 코일이 감긴 횟수를 변화시켜보기도 하였으며 코일의 모양을 나선형 따위로 변화시켜보기도 하였다. 코일 사이에 철심을 넣었다 뺀다해 보기도 하였다. 그러다가 1831년 8월 29일 비로소 두개

의 코일을 인접한 거리에 두고 한쪽 코일에 전류를 흘려주면 다른 쪽 코일에도 전류가 유도되는 현상을 발견하였던 것이다.

패러데이를 비롯하여 당시에 그와 비슷한 실험을 했던 사람들이 바른 전자기 유도 현상에 이르지 못한 것은 바로 전기장과 자기장의 차이를 바로 이해하지 못한 데서 비롯되었다. 오늘날 많은 학생들도 자석이 움직이는 것과 코일에 전류가 발생하는 현상 간에 몇 가지 오개념을 갖고 있으며 이들의 오개념은 여러 가지 면에서 패러데이 시대 사람들이 가졌던 오개념과 유사하다. 그러므로 바른 전자기 유도의 개념은 전기장과 자기장의 차이를 가르치는 것에서부터 시작하여야 할 것이다.

#### 4 과학과 인문학의 다리

과학사는 과학교육에서 인문학적 요소를 제공함으로써 인문학과 과학 간의 공통적 근거를 제공한다. Herbert Butterfield 가 지적한 바와 같이 <서양문명사에서 과학이 한 역할을 생각할 때 조만간 과학의 역사가 그 자체로서 또는 오랫동안 필요로 했던 文科와 과학사이를 다리 놓는 것으로써 차지하게 될 중요성에 대해서는 거의 의심할 수 없을 것이다.><sup>37)</sup> 인문학과 과학을 잇는 다리 학문으로서 과학사는 학생들로 하여금 과학의 발달과정에서 일어난 역사적 사건에 대한 바른 통찰력을 제공해 주며 나아가 전체적인 학문체계 내에서 과학의 좌표를 이해하는데 도움을 줄 수 있다.

과학사를 통해 가치 논의가 주요한 관심사인 인문학과 현상의 설명이나 사실 규명이 주요 관심사인 과학이 연결되는 것은 과학교육과 관련하여 매우 중요한 함의를 갖는다고 할 수 있다. 과학이 인문학의 여러 영역들과 밀접한 관계를 갖고 발달해 온 것을 알 때 과학윤리나 책임 있는 과학운동과 같은 과학기술에 대한 규범적 접근을 할 수 있기 때문이다. 이런 의미에서 과학사는 최근 STS 교육이나 이와 관련된 환경교육의 근거를 제공할 수 있다.

이러한 과학사의 기능에 대해서는 이미 오래 전에 벨기에 태생의 미국 과학사가 사튼에 의해 지적된 바가 있다. 사튼은 과학사가 과학을 인간화하고 인문학을 과학화하는 역할을 해야 한다고 강조하였다. 비록 이 주장이 당시에는 과학자들이나 과학사가들에게 냉담한 반응을 받았지만 근래에 와서는 양쪽 모두의 학자들에 의해 공감대가 이루어지고 있다. 과학의 인간화라는 이상은 과학교육을 통해 가장 효과적으로 실현될 수 있으며 이를 위한 가장 좋은 도구가 과학사라는 인식이 폭

넓게 확산되고 있다.<sup>38)</sup>

이 외에도 과학사는 과학에 대한 학생들의 흥미를 유발시키고 나아가 학생들의 과학지식을 풍요하게 하는 유용한 도구가 될 수 있다. 물론 모든 과학적 내용을 역사적 맥락에서 가르칠 수는 없을 것이다. 아마 과학사적 접근을 하기에 적합한 일부 선택적이고 제한된 주제가 있을 것이다.<sup>39)</sup> 그러나 일반적으로 과학을 딱딱한 과목으로 생각하는 학생들에게 과학의 중요한 개념이나 아이디어, 실험 등을 역사적 상황이나 위대한 과학자들의 성장 배경, 발견 이면에 있는 전기적 일화들과 연결시켜 줄 때 과학 수업은 흥미진진하게 될 수 있을 것이다.<sup>40)</sup>

#### IV. 역사적 교수의 한계와 과제

그러면 과학사는 과학학습의 모든 문을 여는 만능 열쇠인가? 과학사를 과학수업에 도입하는 데 있어서 당면하는 문제는 어떤 것이 있는가? 과학사를 과학교육에 도입하는 데 있어서 주된 문제는 교사의 능력과 학생의 자질, 여기에 더하여 과학사가 요구하는 과학에 대한 사전 지식을 어떻게 확보할 수 있는냐이다. 위에서 살펴본 것과 같이 과학사는 현행 과학교육의 부족한 부분들을 보충하고 나아가 새로운 많은 유익을 제공함에도 불구하고 과학사는 과학학습의 주된 요소는 아니며 어디까지나 보조적인 위치에 있다. 그러면 이 단원을 맺기 전에 과학교육에서 과학사를 도입할 때의 문제점과 한계는 어떤 것들이 있는가 살펴보자.<sup>41)</sup>

우선 우리는 과학수업의 중심적 과제는 어디까지나 과학을 배우는 것이며 역사를 배우는 것이 아님을 기억해야 할 것이다. Johann Wolfgang von Goethe(1749-1832) 는 <과학사는 과학 그 자체이다> (Die Geschichte der Wissenschaft ist die Wissenschaft selbst) 라고 했지만 현대 과학에서는 과학사에 모든 과학 내용을 포함시키기에는 과학적 지식이 너무 많아졌다. 앞에서 언급한 바와 같이 과학사는 <과학의 내용>이나 <과학에 관한 내용>을 가르치는 도구로서의 가치가 있다. 그러므로 수업도구로서 역사적 지식을 사용하면서 과학수업을 더 효과적이고 풍성하게 지도하기 위해서는 교사의 준비가 필수적이다. 교사는 전문적인 과학사가처럼 공부할 필요는 없지만 적어도 가르칠려고 하는 내용의 배경역사는 잘 이해하고 있어야 한다. 그런데 이것은 곧 교사의 수업부담이 가중

됨을 의미한다. 그렇지 않아도 과학 교사는 다른 교사들에 비해 실험준비 및 실험실 운영이라는 부담을 갖는데 여기에 다시 과학사 수업을 위해 부가적 준비를 해야 한다는 것은 현실적으로 쉽지 않은 일이라고 할 수 있다. 교사의 부담을 크게 가중시키지 않고 과학사를 과학수업에 도입할 수 있는 방안을 찾는 것은 과학사적 학습지도의 기본적인 과제이다.

또한 역사를 과학수업에 사용하는 데 직면하는 현실적 어려움 중의 하나는 이를 위한 교재가 부족함을 들 수 있다. 지난 수년동안 역사적 교수의 필요성과 중요성에 대한 많은 언급이 있었지만 현재로서는 실제로 역사적 교수를 할 수 있는 교재나 학습모형 따위가 별로 많이 개발되어 있지 않다. 일부 개론적인 분야에서 과학사를 도입한 교재들이 없는 것은 아니지만 좀 더 다양한 분야에서 다양한 수준의 교재가 많이 개발될 때 비로소 체계적인 과학사적 학습지도가 가능할 것이다.<sup>42)</sup>

교재 개발과 더불어 역사적 교수의 효과를 평가할 수 있는 방법, 초등학교에서부터 대학에 이르기까지 역사적 교수를 위한 교과과정 등 체계적인 과학사적 교수를 위한 조건들의 연구도 이루어져야 할 분야들이라고 할 수 있다. 그러나 세계적으로 과학교육에서 과학사의 중요성에 대한 본격적인 논의가 이루어지기 시작한 것이 최근의 일이고 양쪽을 다 공부한 사람들의 수가 제한되어 있어서 아직 체계적인 연구나 평가기준이 마련되어 있지 못하다. 게다가 과학교육이나 과학사 각각이 이미 間학문(interdiscipline)인데 이들을 결합시키는 과학사적 학습지도는 새로운 間학문이므로 더욱 어려울 것임을 예측할 수 있다.

끝으로 역사적 교수법은 일반적으로 실험수업보다는 교실수업에서 사용하기에 더 적합하다. 몇몇 토픽에 대해서는 과학사를 이용한 의미있는 실험을 구성해 볼 수도 있고 중요한 실험들을 예증해 보일 수도 있다. 그러나 이것은 시범실험일 경우에는 가능할지 모르나 학생들 모두가 역사적인 실험의 재현에 참여하기는 어렵다. 그러므로 현재 실험 중심으로, 혹은 적어도 실험의 중심적 역할을 강조하고 있는 탐구학습 현장에서 어떻게 역사적 교수법을 사용할 수 있는지에 대한 구체적인 전략이 필요하다.<sup>43)</sup>

## 참 고 문 헌

1. Richard A. Duschl, *Restructuring Science Education: The Importance of Theories and Their Development* (New York: Teachers College Press, 1990) pp. 8-11.
2. John Dewey, *Democracy and Education* (New York: Free Press, 1916)
3. British Association for Advancement of Science, *Report of the Twenty-fifth Meeting Held at Glasgow* (London: Murray, 1855)
4. Walter Jung, "Toward Preparing Students for Change: A Critical Discussion of the Contribution of the History of Physics in Physics Teaching", *Science & Education* 3, pp.99-130 (1994)
5. British Association for the Advancement of Science, "Human Aspects of Science", *Report of the British Association for the Advancement of Science* (London: Murray, 1918)
6. "On Instruction in the Classics and the Mathematico-Physical Science", *Popular Scientific Lectures* (1943) ; "On Instruction in Heat Theory", *Zeitschrift* (1887); "On the Psychological and Logical Moment in Scientific Instruction"; *Zeitschrift*(1890)
7. Michael R. Matthews, "Ernst Mach and Contemporary Science Education Reforms", *History, Philosophy, and Science Teaching*, Michael R. Matthews, editor (New York: Teachers College Press, 1911) , pp. 11.
8. Matthews, *History, Philosophy, and Science Teaching*, pp. 13.
9. E. Mach, "On Instruction in the Classics and the Science", *Popular Scientific Lectures* (La Salle, IL: Open Court Publishing, 1983, 1943) pp.368.
10. E. Mach, "On Thought Experiment; Knowledge and Error" (Dordrecht: Reidel, 1976 (orig. 1905)) pp.203
11. O. Bluh, "Ernst Mach-His Life As a Teacher and Thinker", *Ernst Mach-Physicist and Philosopher*, R. S. Cohen and R. J. Seeger, editors (Dordrecht: Reidel, 1970) pp. 13.

12. J. T. Blackmore, Ernst Mach: His Work, Life and Influence, (Berkeley, CA: University of California Press, 1972) pp. 139.
13. James B. Conant, On Understanding Science (New York: Mentor, 1947); Science and Common Sense (New Haven: Yale University Press, 1951); Gerald Holton, "The Relevance of Physics," Physics Today November 1970, pp. 40-47; 송상용 편저, 교양과학사 (우성문화사, 1984). pp. 22-25.
14. R. W. Bybee, "The New Transformation of Science Teaching", Science Education 61(1), pp. 85-97 (1997); J. Gallagher and R. E. Yager, "Science Educators Perceptions of Problems Facing Science Education: A Report of Five Surveys", journal of Research in Science Teaching, 18(6); pp. 505-514 (1981); P. de H. Hurd, New directions in Teaching Secondary School Science(Chicago: Rand McNally, 1984).
15. National Science Teachers Association, Science-Technology Society: Science Education for the 1980s (Washington, DC: Author, 1982); National Science Board, Educating Americans for the 21st Century (Washington, DC: U.S. Government Printing Office, 1983); American Association for the Advancement of Science, Science for all Americans (Washington, DC: Author, 1989); Association for Science Education, Education Through Science (Hatfield, Herts: Author, 1981).
16. National Curriculum Council, Science in the National Curriculum (York: Author, 1988)
17. American Association for the Advancement of Science, Science for All Americans (Washington, DC: Author, 1989).
18. Matthews, "Introduction", History, Philosophy, and Science Teaching, pp. 2.
19. H. Nielsen and P. V. Thomsen, "History and Philosophy of Science in the Danish Physics Curriculum", International Journal of Science Education 12(3) pp. 308-312 (1990).
20. Synthese 80(1), 1989; Science Education, 1990; Educational Philosophy and Theory 20 (2), 1988; Studies in Philosophy and Education 10(1), 1990; Interchange 20(2), 1989; International Journal of Science Education 12(3), 1990.

20 科學教育(1997. 12.)

21. M. Shortland and A. Warwick, editors, *Teaching the History of Science* (Oxford: Basil Blackwell, 1989).
22. 송상용, *청량원*, 25권 1호 (1971. 8.)
23. 양승훈 편저, *물리학과 역사: 역사적 교육법(Historical Teaching)을 이용한 물리학과 개념학습*(서울: 하늘기획, 초판 1993, 증보개정판 1995).
24. Leonardo Sanchez, "On the Implicit Use of history of Science in Science Education," *The History and Philosophy of Science in Science Teaching*, Edited by Don Emil Herget (Science Education and Department of Philosophy, Florida State University, Tallahassee, FL, 1989) pp. 306-308.
25. James H. Wondersee, "On the Value and Use of the History of Science in Teaching Today's Science: Constructing Historical Vignettes," *More History and Philosophy of Science in Science Teaching*, pp. 279.
26. Arnold B. Arons, "Historical and Philosophical Perspectives Attainable in Introductory Physics Courses", *History, Philosophy, and Science Teaching*.
27. Giorgio de Santillana, *The Crime of Galileo* (Chicago: University of Chicago Press, 1955).
28. David C. Lindberg and Robert S. Westman, editors, *Reappraisals of the Scientific Revolution* (Cambridge: Cambridge University Press, 1990).
29. Jack Lochhead and Robert Dufresne, "Helping Students Understand Difficult Science Concepts Through the Use of Dialogue with History," *The History and Philosophy of Science in Science Teaching*, Edited by Don Emil herget (Science Education and Department of Philosophy, Florida State University, Tallahassee, FL, 1989) pp. 222; Wondersee, *More History and Philosophy of Science in Science Teaching*, pp. 279.
30. Leonardo Sanchez, *The History and Philosophy of Science in Science Teaching*, pp. 309.; Brain R. McClain, "A Teacher's Analysis of the absence of the History and Philosophy of Science in the State of Florida's student Performance Standards," *The History and Philosophy of Science in Science teaching*, Edited by Don Emil Herget (Science Education and Department of Philosophy, Florida State University, Tallahassee, FL, 1989) pp. 257-258.

31. Patick Kenealy, "Telling a Coherent Story: A Role for the History and Philosophy of Science in a Physical Science Course," *The History and Philosophy of Science in Science Teaching*, Edited by Don Emil Herget (Science Education and Department of Philosophy, Florida State University, Tallahassee, FL, 1989) pp. 210; Michael R. Matthews, "A Role for History and Philosophy in School Science Teaching", *Educational Philosophy and Theory*, 20(2) pp. 67-81 (1988);
32. J. Novak, *Proceedings of the Second International Seminar on misconceptions and Educational Strategies in science and mathematics*, Cornell university, Ithaca, NY(1987)
33. Lochhead and Dufresne, *The History Philosophy of Science in Science Teaching*, pp. 222-223; Kenealy, *The history and Philosophy of Science Teaching*, pp. 213; Wondersee, *More History and Philosophy of Science in Science Teaching*, pp. 278.
34. Anna Maria Pessoa de Carvalho, "The Influence of the History of Momentum and its Conservation on the Teaching of Mechanics in High School," *More History and Philosophy of Science in Science Teaching*, Edited by Don Emil Herget (Science Education and Department of Philosophy, Florida State University, Tallahassee, FL, 1990) pp. 212.
35. Amelia Imperio Hamburger, "Epistemological and Historical Studies of Physics Concepts for Science Teaching," *The History and philosophy of Science in Science teaching*, ed. Don Emil Herget (Science Education and Department of Philosophy, Florida State University, Tallahassee, FL, 1989) pp. 80.
36. A. Ampere, "De l'action mutuelle de deux courans electriques", *Ann. Chim. Phys. Ser. II*, 15(1820) pp. 59-76.
37. Herbert Butterfield, *The Origins of Modern Science*, Revised Edition (New York: Free Press, 1957) pp. 7.
38. George Sarton, *The history of Science and the New Humanism* (Bloomington, IN: Indiana University Press, 1962); 송상용, *교양과학사*, pp. 22.

39. Wondersee, More History and Philosophy of Science Teaching, pp. 279, 282.
40. Jung, Science & Education 3, pp. 117-118 (1994).
41. Jenkins, History, Philosophy, and Science teaching, pp. 36.
42. A. B. Arons, Development of Concepts of Physics (Reading, MA: Addison-Wesley, 1965); G. Holton, Introduction to Concepts and Theories in Physical Science (Reading, MA: Addison-Wesley, 1952); F. J. Rutherford, G. Holton and F. G. Watson, The Project Physics Course (New York: Holt, Rinehart & Winston, 1970).
43. Wondersee, more History and Philosophy of Science in Science Teaching, pp. 278.