



실험의 의미 재고를 통한 현상중심의 실험교육의 필요성 제안 -이언 해킹(Ian Hacking)의 현상의 창조를 중심으로-

최진현, 전상학*
서울대학교

Proposal for Phenomena-based Experimental Education through Reconsidering the
Meaning of Experimentation:
Based on Ian Hacking's Creation of Phenomena

Jinhyeon Choi, Sang-Hak Jeon*
Seoul National University

ARTICLE INFO

Article history:

Received 13 October 2023

Received in revised form

24 October 2023

Accepted 4 February 2024

Keywords:

Ian Hacking, phenomenon-based
experimentation,
experiment education,
creation of phenomena,
intervening, manipulation

ABSTRACT

In this study, we explored the philosophical perspective of Ian Hacking on experimentation and discussed its potential impact on science education in schools. Traditionally, many philosophers have advocated a theory-driven view of experimentation, emphasizing its importance primarily in validating theories. Similarly, in the context of education, the prevailing perspective has been to focus on experimentation primarily as a means of confirming and proving theories. However, in contrast to this theory-driven perspective, philosophers like Hacking have proposed that experimentation itself possesses autonomy and vitality. Through their discussions, they have brought to light the significance of previously overlooked elements in experiments, such as tool usage, materials, and the involvement of scientists. They have prompted a reevaluation of the role and importance of experiments in scientific activities. Therefore, in this study, we consider the application of this philosophical standpoint to school experimental education. We anticipate that the phenomenon-centered perspective we propose in this research will be beneficial for teaching scientific practices, including tool usage, the involvement of experimenters, and modeling activities.

1. 들어가며

학교 선생님들은 과학적 방법에 무엇이나 우리의 물음에 실험이라고 답해주셨을 수도 있다. 그러나 과학의 역사는 실험이 아닌, 늘 이론의 역사로 이해되었다. 철학자들은 실험이 이론을 검증할 때에만 가치가 있다고 말하며 실험 그 자체로는 생명력이 없다고 말한다. 그래서 우리는 실험의 다양한 역할을 설명하기 위한 용어조차 부족하다고 할 수 있다(Hacking, 1991).

‘과학자’하면 가장 먼저 떠오르는 이미지는 흰색 가운을 입은 연구원이 액체가 담긴 비커를 가볍게 흔들어보는 모습이나 그와 유사한 이미지일 것이다(Chambers, 1983; Huber & Burton, 1995; Lim & Yeo, 2001; Maoldomhnaigh & Hunt, 1988). 실제로 학생들의 과학자에 대한 인식을 조사한 선행연구에 따르면, 학생들은 ‘과학자’하면 연상되는 모습으로 흰색 가운을 입은 괴팍한 과학자의 모습을 가장 많이 떠올린다고 응답하기도 한다(Han, Choi, & Noh, 2012; Wong & Hodson, 2009; Yoon, Park, & Myeong, 2006). 비록 과학자가 실제로 흰색 가운을 입고 실험을 하는 모습은 일부 분야에 한정된 과학자의 모습이 투영된 것이지만, 대다수의 과학자들은 실험실에 소속되어

실험을 수행하고 있다는 점(Hong, 2020)에서 학생들의 과학자에 대한 이미지가 잘못되었다고 말하기는 어려울 것이다. 이처럼 학생들은 과학자를 실험가와 거의 동일한 것으로 인식하고 있지만, 정작 과학자가 실험실에서 하루 종일 어떤 일을 수행하는지 알고 있는 학생은 드물다. 학생들과 대화를 나눠보면 막연히 실험을 통해 늘 새로운 사실을 발견한다든가 혹은 새로운 물질을 합성한다든가 하는 막연한 생각을 가지고 있다(Barman, 1999; Fung, 2002; Kim & Cho, 2002; Kim, Park, & Kim, 2012; Lee, Kim, & Song, 2008; Lim, & Yeo, 2001). 또한, 흥미로운 사실은 학생들에게 ‘과학을 잘하기 위한 역량’을 물어보았을 때, ‘실험을 잘하는 역량’을 꼽는 학생은 극히 드물다는 것이다(Lee, Kim, & Song, 2008). 즉, 학생들은 ‘과학을 하는 것’을 ‘실험을 하는 것’과 동일하게 이해하고 있음에도 정작 실험을 잘하기 위한 역량에 대한 고민보다는 과학적 개념이나 지식과 같은 이론을 중심으로 생각하며, 이러한 경향은 상급학교로 갈수록 두드러진다.

학생들의 인식의 불일치는 단순히 과학 혹은 과학자라는 미지의 영역에 따른 정보량의 차이에서 발생하는 것이 아니라 학교나 매체에서 다루는 과학자의 이미지(Boylan, 1992; Lim, & Yeo, 2001)에 의해서, 구체적으로 학교실험교육에서 다루고 있는 실험의 두 가지 버전에 근거한다고 할 수 있다. 학교실험교육에 가장 큰 영향력을 미친

* 교신저자 : 전상학 (jeonsh@snu.ac.kr)

본 논문은 최진현의 2024년도 박사 학위논문에서 발췌 정리하였음
<http://dx.doi.org/10.14697/jkase.2024.44.1.29>

버전 중 하나는 1960년대와 1970년대에 시행된 미국의 SAPA (Science-A Process Approach) 교육과정과 영국의 너필드 프로젝트(Nuffield project)로 대표되는 것으로서 실험을 통해 자연의 원리와 법칙이 드러난다는 관점이다(Huxley, 1893; Matthews, 1994; Turner, 1927; Wellington, 2002). 소위 발견주의 또는 기능주의로 대표되는 이러한 입장은 학생들이 위계적(hierarchical)이고 기능(skill)중심적인 과정을 체험함으로써 과학 지식을 발견하고, 이러한 지식이 타영역으로 전이될 수 있을 것이라 보는 입장이다(Sanderson & Kratochvil, 1971; Wellington, 2002). 따라서 학생들은 과학자가 되어 가설 세우기, 관찰하기, 실험하기 등과 같은 탐구적인 기능들(investigative skills)을 수행함으로써 자연에 널려 있는 과학 지식, 이론을 습득하도록 권장된다.

또 다른 실험의 이미지는 발견주의와 기능주의를 비판하면서 형성된 버전으로서 실험은 이론으로부터 출발하며, 실험 결과는 이론에 의해 의미를 갖는다는 것이다(Han, 2004b; Jenkins, 1980; Wellington, 2002). 이는 첫 번째 버전, 발견주의에 대한 회의적인 시각으로, 순수 관찰을 통한 설명이 나타날 것이라는 귀납주의의 한계를 비판하면서 등장한 것이라 할 수 있다(Hodson, 1996a; Millar, 2005; Wellington, 2002). 이러한 관점에서는 학생들이 선행되는 이론이나 과학적인 지식이 없는 유의미한 학습이 일어나기 어려우므로, 적절한 개념, 원리, 이론 등을 먼저 배우고, 이를 토대로 현상을 해석하거나 평가해보는 등의 활동이 권장된다.

비록 1980년대 교육개혁 이후로 두 번째 버전이 강조되고 있으나, 현재 학교에서 다루어지는 실험의 이미지는 위의 두 버전이 혼재된 것으로 볼 수 있다. 즉, 학교 현장에서 순수한 관찰을 통한 과학 지식의 발견이라는 순진한 믿음을 가지는 교사들은 드물겠으나, 발견학습에서 강조된 탐구의 절차, 기초 기능(basic skill)과 통합 기능(integrated skill), 탐구 프로그램 등이 여전히 중요하게 다루어지고 있는 것이다(Han, 2004b; Hwang, 2002; Wellington, 2002; Woolnough & Allsop, 1985). 우리나라의 교육과정에서도 두 가지 버전이 혼합되어 있음을 확인할 수 있다(Choi & Jeon, 2022; Oh, 2020).

‘과학탐구실험1’과 ‘과학탐구실험2’는 과학의 본성과 역사 속의 과학 탐구, 과학 탐구의 과정과 절차, 생활 속의 과학 탐구, 미래 사회와 첨단 과학 탐구 영역을 관통하는 지식·이해, 과정·기능, 가치·태도의 세 차원을 아울러 구성하되, 과학 지식 생산을 위한 과학탐구실험 활동의 체계적·실천적 경험을 제공하는 데 중점을 둔다(MOE, 2022, p.92).

그러나 우리가 주목해야 할 지점은 학교에서 다루어지는 이미지의 혼재가 아니라 두 버전 모두 이론 지배적(theory-dominated) 관점이라는 사실이다(Hodson, 1986; Wellington, 2002). 두 버전 사이에는 큰 철학적 간극이 존재함이 분명하다. 하지만, 학교 현장에 적용되는 과정에서 전자의 버전은 ‘실험을 통해 이론을 배운다’는 목표가 강화되었고(Armstrong, 1910; Stevens, 1978), 후자의 버전에서는 ‘실험을 통해 이론을 확인한다’라는 목표가 설정되었다. 즉, 서로 다른 두 버전은 모두 실험을 이론과 떼어놓을 수 없는 관계로 규정하고 있음을 알 수 있다. 이러한 관점에서 실험교육을 받은 학생들은 과학적 방법으로 실험을 받아들이지만, 과학의 역사를 이론사(the history of theory)로 이해하는 것이 당연한 일이다.

그렇다면, 진실로 실험은 이론을 위해 존재하는 것일까? 이론이

없는 실험은 의미가 없는 것인가? 비단 과학교육뿐 아니라 과학철학에서 다루어진 실험의 이미지를 살펴보면 “그렇다”고 대답할 수 있을 것이다. 예로부터 실험의 인식적 지위는 이론에 비해 높지 않았기 때문이다. 아리스토텔레스로 대표되는 자연주의 철학자들은 실험을 통해 지식을 얻는 행위를 평가절하 하였는데, 자연을 그대로 관찰하는 것이 아니라 인간이 자연에 개입함으로써 자연을 망친다고 보았기 때문이다(Hong, 2020). 물론 17세기에 베이컨(F. Bacon)과 같은 학자들이 실험의 중요성에 대해 기술하기도 하였으나 관찰의 이론의 존성과 같은 철학적 논의들은 ‘실험은 이론을 위해 존재한다’고 인식하게끔 만들었으며, 대부분의 학자가 그렇게 인식하기에 충분하였다. 하지만, 1980년대 해킹(I. Hacking)을 비롯한 갤리슨(P. Galison), 아커만(R. Ackermann)과 같은 과학철학자들은 과학이론을 위한 도구로서의 실험이 아닌, 실험 그 자체의 성격과 기능에 대한 인식적 논의를 시작하였다(Lee, 2006; Morrison, 1990). 해킹으로 대표되는 실험 철학자들은 ‘실험은 이론을 위해 존재하는가?’라는 질문 앞에서 “그렇지 않다”고 대답한다. 이들은 실험이 이론으로부터 일정한 자율성을 보인다는 점, 실험의 결과가 반드시 사회적으로 결정되는 것만은 아니라는 점을 들어 실험의 이론존성을 비판한다. 이들의 논의가 다소 현학적이고 형이상학적이라고 생각할 수도 있으나, 이들의 논의에서 발견되는 실험의 새로운 모습은 과학철학뿐 아니라 과학교육에도 시사하는 바가 크다.

학교실험교육에서 제기되는 가장 대표적인 비판은 학생의 활동이 ‘요리책식’ 활동으로 변질되었다는 비판일 것이다(Han, 2004a; Hodson, 1996a; Wellington, 2002). 즉, 학생들이 아무런 생각 없이 지시대로 수행되는 실험실 활동이 비판의 대상인데, 이는 실험수업의 최종 종착지가 이론의 확인 또는 증명에 있기 때문이다. 구체적으로 교사는 실험을 통해 과학 지식 또는 이론을 전달할 의무감을 가지는데, 간단한 실험 상황에서는 실험을 굳이 수행하지 않아도 결과가 쉽게 예측되어 학생의 흥미를 끌지 못하여 요리책식 실험으로 수행되는 경향이 있다. 반면, 비교적 복잡한 실험 상황에서는 이론과 다른 결과물이 도출되는 경우가 빈번하게 일어나 교사들은 학생들에게 실험의 방법과 절차를 엄격하게 준수할 것을 요구하게 되는 것이다. 물론 학생의 수준과 흥미를 고려하여 적절한 수준의 실험수업을 수행하는 것이 불가능한 것은 아니겠으나 이론이 실험에 선행되어야 한다는 관점에서는 좀처럼 수행되기가 어려운 것이다.

이에 본 논문에서는 실험철학이라는 테제를 연 이언 해킹의 핵심적인 주장을 중점적으로 살펴보고, 이를 바탕으로 현상중심의 실험교육의 필요성을 제안하고자 한다. 따라서 본 연구에서는 해킹의 『Representing & Intervening (1983)』에서 주요하게 다루고 있는 논제를 요약적으로 소개하고자 하며 본 연구에서 다루고자 하는 논제는 아래와 같다.

첫째. 실험의 자율성은 무엇인가?

둘째. 해킹이 주장하는 과학적 실험의 세 가지 구도는 무엇이며, 어떠한 의의가 있는가?

셋째. 현상중심의 실험은 과학교육에 어떠한 교육적 함의가 있는가?

1) 이하 괄호안의 페이지는 해킹의 『Representing & Intervening (1983)』의 페이지이다.

II. 실험의 자율성

실험철학이 태동하기 이전의 상당수의 과학철학자들은 실험은 이론에 종속되는 존재로 보았다(Lee, 2011). 즉, 파울리가 중성미자(neutrino)를 이론적으로 미리 예측한 사실이나 아인슈타인의 중력과 예측, 크릭의 tRNA 존재의 예측과 같은 수많은 실험들처럼 이론이 실험을 선행한다고 본 것이다. 이러한 이론 선행적 관점에서는 실험은 이론을 증명할 때에만 의미가 있는 것으로 간주된다. 그러나 1980년대 이르러서 해킹을 비롯한 실험철학자들이 등장하면서 이론으로부터 자율적인 실험의 모습이 논의되기 시작했다. 이들의 논증의 방식은 학자마다 다른 특징을 보인다. 가령, 갈리슨은 도구의 자율성을 통해 실험의 자율성에 대해 논증하였고(Galison, 1987), 아커만은 실험자의 자유로운 탐구를 통해 논증하고자 하였으며(Ackermann, 1989), 이상원은 도구 이론과 해석 이론을 통해 실험의 자율성에 대해 논의한 바 있다(Lee, 2002, 2006). 이처럼 많은 과학철학자들은 다양한 방식을 통해 실험의 자율성을 논의하였다. 본 논문에서 주요하게 살펴볼 해킹의 주장은 후술할 사변이라고 불리는 상식적 지식(common lore) 또는 일상적 진리(home truths)를 통해 만들어지는 현상의 안정화(stabilize phenomena)를 통한 실험의 자율성이다.

1. 해킹의 실험의 자율성

모든 조사에서 베이컨은 실험에 큰 가치를 둔다. 그러나 그는 실험의 의미를 전혀 이해하지 못한다. 그는 실험이 어떤 결과를 스스로 가져올 메커니즘이라고 생각한다. 그러나 과학에서 모든 조사는 추론적이거나 선행적이다. 실험은 계산과 유사한 사고의 도움일 뿐이며, 그 의미를 가지려면 사고는 항상 필연적으로 그 앞에 와야 한다. 일반적으로 말하는 경험적인 연구 방법은 존재하지 않는다. 이론 없이 진행되는 실험은 과학 연구에 있어 어린이의 딸랑이와 음악 간의 관계와 같다(p.153).

해킹은 질소 비료를 발명하여 농업 혁명을 일으킨 유기화학의 선구자 리비히(J. von Liebig)의 탐구에 대한 의견을 위와 같이 직접 인용하면서 다음과 같은 물음을 던진다. ‘실험은 이론으로부터 자율적인가?’ ‘실험을 수행하기 위해서 이론이 반드시 필요한가?’ 해킹에 따르면, 이러한 질문은 모호하며 두 개의 진술로 양분될 수 있다(pp.153-154). 하나는 진술은 이론과 실험의 약한 버전(weak version)으로 실험을 수행하기 앞서 자연과 도구에 대한 몇몇 관념을 가져야 한다는 것이다. 예를 들어, 최초로 항생제를 개발한 사람으로 알려진 플레밍(A. Fleming)은 항생제 실험을 진행할 때 몇 가지 관념을 가졌을 것으로 예상된다. 가령, ‘포도상구균이 배양된 패트리디쉬가 곰팡이에 의해 오염되었는데, 이는 어떤 특수한 현상일 것이다’, ‘곰팡이는 포도상구균을 배양하기 위해 만든 배지에서 잘 자라는 것 같다’와 같은 것들이다. 반면, 이론과 실험에 대한 강한 버전(strong version)은 정밀하게 조사되고 있는 현상에 관한 이론을 시험하고 있을 때에만 실험이 의미가 있다고 말하는 것이다. 구체적으로 플레밍이 ‘곰팡이의 세균을 억제하는 물질이 포도상구균을 모두 죽였을 것이다’라는 견해를 가졌을 때에만 의미가 있다는 것이다. 해킹은 강한 버전의 진술이 단순히 부정될 수 있다고 말한다. 가령 플레밍이 호기심에 별다른 생각 없이 무슨 일이 일어날지 확인하기 위해서 실험을 수행한다면 강한 버전의 진술은 즉각 기각될 수 있다는 것이다.

해킹은 실험이 이론을 선행한 다양한 사례들을 예시로 이론 선행적인 관점을 반박한다. 비록 해킹은 자신의 논의를 통해 이론에 대한 두 가지 진술 중에서 오직 강한 버전에 관한 논의에 관심이 있다고 밝히고 있다. 하지만 해킹은 약한 버전조차 의심의 여지가 있다고 언급하며(p.154), 자신의 논의를 통해서 이론 선행적 관점을 미심쩍게 만드는 일에는 충분할 것이라고 밝힌다. 해킹이 소개하는 대표적인 예시 중 하나는 우주배경복사(cosmic microwave background, CMB)를 최초로 측정한 펜지어스(A. Penzias)와 윌슨(R. W. Wilson)의 이야기이다.

2. 우주배경복사²⁾

1965년, 미국 벨 연구소의 천문학자 펜지어스와 윌슨은 전파망원경을 활용하여 우주를 관찰하고 있었다. 이들은 통신 위성으로 사용되던 안테나를 개조하여 전파망원경으로 사용하고 있었다. 그들이 개발한 전파망원경은 우주에서 오는 신호를 수신하는 데 문제는 없었지만, 강력한 잡음이 발생하였다. 강력한 잡음은 우주의 모든 방향에서 감지되었기 때문에, 이들은 우주에서 오는 신호가 아닌 전파망원경 자체의 문제라고 생각하였다. 그들은 전파망원경을 여러 차례 분해 및 조립하기도 하였고, 심지어 망원경 표면의 비둘기 배설물까지 치우기도 하였다. 이러한 노력에도 불구하고 전파망원경에서 잡히는 잡음은 사라지지 않았는데, 이들은 결국 전파망원경에서 탐지되는 잡음이 우주에서 온 일정한 복사에너지(3K)이라고 결론을 내리게 되었다.

그리고 이들은 우연히 동료 연구자를 통해 프린스턴 대학의 교수로 재직 중인 디키(R. H. Dicke)가 ‘우주가 대폭발(Big Bang)에서 기원했다면, 우주 전체에 폭발의 잔여 온도가 존재할 것이라는 주제의 논문을 준비한다는 사실을 알게 되었다. 디키는 자신의 이론을 뒷받침하기 위해서 우주복사 에너지를 탐지하려고 준비 중이었는데, 펜지어스와 윌슨과 통화를 통해 자신이 찾으려던 복사에너지를 펜지어스와 윌슨이 먼저 발견했음을 깨달았다. 디키는 펜지어스와 윌슨과 통화 후에 그의 동료들에게 “우리가 한발 늦었다”고 말하기도 하였다고 한다. 이후, 펜지어스와 윌슨은 우주배경복사를 발견한 공로로 1978년 노벨상을 수상하였고, 이들의 상사인 벨 연구소의 카미노프(I. Kaminow)는 이 사건을 두고 “그들은 똥을 찾았지만 금을 발견했다. 이것은 대부분 우리가 겪는 경험과 정반대이다(looked for dung but found gold)”라고 언급하기도 하였다.

위 사례 살펴볼 수 있듯이, 펜지어스와 윌슨은 어떠한 이론을 시험하기 위해서 실험을 수행하지 않았다. 그들은 단지 더 좋은 관찰 결과를 얻기 위해서 실험을 수행했을 뿐이다. 두 과학자의 실험은 어떠한 이론으로부터 연역되지 않았으며, 오히려 실험의 영향을 받아 빅뱅 이론이 점점 실질화 되어갔다.³⁾ 해킹은 펜지어스와 윌슨이 실험을 수행하기 전에 가졌던, 그리고 실험을 수행하면서 가졌던 관념에 주목한다. 물론 이들이 실험을 수행하면서 여타의 추측을 가졌을지도 모른다. 그러나 그들이 가졌던 관념들은 이론 선행적 관점의 철학자들이 언급하는 일반성 혹은 연역적 힘의 수준을 가진 과학적 이론이

2) Advancing Physics (APS) News의 기사(APSNews, 2002)와 Hacking (1983)의 우주배경복사에 대한 논의(pp.160-161)를 재구성하였음.

3) 펜지어스와 윌슨의 실험이 빅뱅 이론의 증거가 되었다는 사실은 실험이 이론을 선행했다는 점 외에는 과학사를 ‘이론의 역사’로 이해하는 기존의 관념을 크게 뒤집지 못하는 것처럼 보인다. 그러나 과학 이론이 절대불변의 진리가 아닌 잠정성을 가진다는 점에서 과학의 역사를 펜지어스와 윌슨의 사례와 같이 일정한 결과를 재현하는 실험의 역사가 아닌 잠정성을 지닌 이론의 역사로만 이해되는 것에 대한 문제의식을 제기하는 것이라 할 수 있다.

아닌, 사변(speculation)의 상이한 종류로서 흥미로운 사실에 대한 지적 표상, 온갖 종류의 쓸데없는 생각들, 유비이다. 혹자는 이러한 ‘사변’이 과학적 이론 혹은 가설을 포함하며, 그것이 실험에 필수적인 것이라고 반박할 수도 있을 것이다. 그러나 해킹은 이것이 원초적인 믿음(proto-belief)일 뿐이라고 단언한다.

구체적으로 해킹은 우리가 눈앞에 텍스트를 인식할 때, 공기가 단어를 왜곡하지 않을 것이라는 가정하며 ‘공기의 왜곡 없음 이론’을 언급하는 것은 부적절하다고 주장한다. 그것은 우리가 사물을 바라봄에 있어 그 대상과 직접적으로 상호작용하며 판단할 수 있기 때문이다. 만일 이러한 원초적인 믿음까지도 ‘이론’으로 환원한다면, ‘이론적재성’이라는 철학적 테제의 지위가 상당수준 낮아질 것이라는 주장이다(p.175).

그러므로 나는 내가 보는 인쇄물과 나 사이의 공기가 단어들의 모양을 왜곡하지 않는다는 가정을 할 수 있을 것이며, 아마도 이 가정을 조사할 수 있을 것이다. 그러나 내가 소리를 내거나 이 페이지를 수정할 때는 단순히 내게 흥미로운 것(텍스트)과 상호 작용하는 것뿐이며, 가정에 대해 이야기하는 것은 잘못된 것이다. 특히 이론적인 가정에 대해 언급하는 것은 잘못된 것이다. 나는 공기에 의한 왜곡 없는 이론이 어떤 것인지 전혀 모른다. 물론 모든 믿음, 초기 믿음 및 고안될 수 있는 믿음을 모두 이론이라고 부르고 싶다면 그렇게 하는 것도 가능할 것이다. 그러나 그러면 이론에 대한 주장은 유효한 것이다(p.175).

결론적으로 해킹은 앞서 언급한 강한 버전, ‘실험은 이론을 시험하고 있을 때에만 의미가 있다’는 진술은 옳지 않다고 주장하며, 이 밖에 해킹은 실험이 이론을 선행했던 다양한 역사적 사건들⁴⁾을 언급하면서 실험의 자율성에 대해 주장한다. 이것은 해킹이 때때로 커다란 사변이 실험에 앞서 선행하는 사례가 존재한다는 것을 부정하는 것이 아니다. 다만, 해킹은 ‘실험의 일면만을 바라보는 것은 분명히 잘못된 일(p166)’임을 우리에게 알려주고 있는 것이다.

따라서 나는 실험적인 연구가 이론과 독립적으로 존재할 수 있다고 주장하지 않는다. 그것은 베이컨이 ‘순수 경험주의자라고 조롱한 사람들의 맹목적인 노력이 될 것이다. 그러나 여전한 사실은 많은 굉장한 기본적인 연구가 어떤 관련 이론조차 없이 먼저 이루어진다는 것이다(p.158).

III. 사변, 연산, 실험하기

실험자들은 개미와 비슷하다. 그들은 자료를 수집하고 사용할 뿐이며, 이성적인 사고자들은 자신의 물질로 거미와 비슷하게 거미줄을 만든다. 그러나 벌은 중간 길을 택한다. 그것은 정원과 들의 꽃에서 자료를 수집하지만, 자체적인 능력으로 변형하고 소화한다. 진정한 철학의 업무도 이와 비슷하다. 이는 머릿속의 능력만을 의존하거나 주로 의존하지 않으며, 자연사와 기계실험에서 수집한 자료를 그대로 기억에 저장하지 않는다. 대신, 그것을 이해력에 변형되고 소화되게 저장한다(Bacon, 1620, p.80).

실험을 통한 귀납적 방법론을 처음으로 강조한 베이컨(F. Bacon)은 제1원리로부터만 지식을 이끌어내려는 시도에 대해 비판적인 입장을 취했다. 베이컨은 더 낮은 수준의 지식에서 진리를 발견하는 귀납주의를 추구한 것이다. 그러나 베이컨은 단순히 현상의 나열을 통해 결론을 내리는 일은 잘못되었다고 지적하며 심지어 그러한 행위를 유효한 행위라고 언급하였다. 해킹이 평가하기로 베이컨은 연역주의 또는 귀납주의 그 어느 쪽에도 속하지 않은 사람인데, 그가 신기관에서 언급한 개미와 거미의 비유는 이러한 사실을 잘 보여준다. 베이컨은 실험하는 일과 추론하는 일을 분리하여 생각한다. 베이컨은 좋은 실험가는 개미와 같이 부지런하면서 동시에 거미와 같이 추론하는 일을 게을리하지 않는 벌과 같은 사람이라고 주장한다. 즉, 어느 것에도 치우치지 않고 실험하는 일과 추론하는 일이 연합될 때 자연을 이해할 수 있다는 입장인 것이다.

해킹은 베이컨의 착상을 이어받아 과학적 실험을 사변(speculation), 연산(calculation), 실험하기(experimentations)라는 세 개의 구도를 제안한다(p.212). 해킹은 과학적 활동이 세 구도의 협력이며 사변이 실험을 야기하거나 실험이 사변을 야기하는 일방향적인 활동이 아닌 서로 다른 발전과정에서의 맞물림(연산)이라고 말한다.

과학적 방법이 무엇인가? 실험이 과학적 방법인가?에 대한 질문은 사실 문제가 잘못 제기되었다. 과학의 방법이 왜 필요한 것인가? 집을 짓거나 토마토를 키우는 것과 같이 다양한 방법으로 접근할 수 있는 것처럼 지식의 확장 또한 하나의 방법론에 구속되어서는 안 된다. (중략) 우리는 이론과 실험 간의 관계가 발전의 다른 단계에서 다르다는 것을 발견할 것이며, 모든 자연과학이 동일한 주기를 거치지 않는다는 것을 알게 될 것이다. 너무나 당연한 것 같지만, 이것은 종종 Karl Popper와 같은 사람들에게 의해 부인되었다(pp.152-155).

이러한 해킹의 입장은 ‘실험은 이론을 시험할 때에만 의미가 있다’는 연역적인 관점과 대치되며, ‘순수 관찰을 통해 자연현상을 해석한다’는 귀납적인 입장을 지지하는 것처럼 보인다. 이에 대해 해킹은 연역 혹은 귀납이라는 이분법적 관점 속에서 어느 특정한 구도를 지지하는 것은 아니며(p.166), 과학적 방법이라는 이름 아래 규정되어 온 실험의 이미지에 대한 재고하는 일종의 태도이자 운동(movements)임을 표방한다(p.26). 따라서 해킹은 새로운 과학적 방법을 주창하고 논증하기보다는 몇몇 실험사를 소개함으로써 기존의 과학적 방법에 대한 이미지를 흐리게 만들며, 이론이 아닌 과학 하기(doing)를 강조한다.

1. 사변⁵⁾

해킹은 단어 ‘사변’을 모든 종류의 의미 없는 말이나 엉뚱한 생각이라고 정의한다(p.212). 즉, 해킹은 사변을 흥미로운 현상에 대한 지적 표상을 나타내는 것으로서 과학자가 현상을 이해하기 위해 던지는

4) 해킹은 바르톨린(E. Batholin)의 복굴절(double refraction)의 발견과 이와 관련된 실험, 브라운(R. Brown)의 브라운 운동(Brownian movement) 실험, 아인슈타인의 광전효과에 영향을 준 베르셀(A.-C. Becquerel)의 금속실험, 펜지어스(A. Penzias)와 윌슨(R. W. Wilson)의 우주 에너지 실험 등 다양한 실험을 예로 보여준다. 이중 몇몇은 때때로 이론이 먼저 선행했다고 잘 알려져 있는데, 이는 해당 실험이 ‘역사’가 되는 과정에서 이론사적으로 기술되기 때문이라고 지적하였다(p.160).

5) 원문 speculation을 국내 번역서의 표현에 따라 사변으로 번역하였다. 해킹에 따르면(Hacking, 1991), 포퍼의 ‘추측(speculation)’과 ‘반박’이 실험이 이론을 테스트하는 잘못된 이미지를 형성하게 만들었다고 본다. 이러한 언급을 고려한다면, speculation을 ‘추측’이라고 번역함이 마땅하겠으나, speculation을 설명하는 해킹의 문장 ‘The word ‘speculation’ can apply to all sorts of waffling and stock-marketeeing (p.212)’로 미뤄볼 때, ‘추측’보다는 ‘사변’이 더 적절하다는 연구자의 판단이 있었다.

온갖 종류의 말이라고 정의한다. 예를 들어, 낮에 해가 일시적으로 사라지는 현상을 관찰했다고 가정해보자. 현재는 그것이 개기일식임이 잘 알려져 있지만, 과학적으로 설명되기 이전의 과학자는 개기일식 현상을 설명하기 위한 여러 종류의 사변을 떠올릴 수 있다. 구체적으로 ‘신이 진노했다’, ‘두꺼운 구름이 태양을 완전히 가렸다’, ‘태양과 지구 사이에 어떤 행성이 순간적으로 지나갔다’와 같은 다양한 종류의 사변이 가능할 것이다. 여기에는 정성적인 사변만 존재하는 것이 아니라 정량적인 사변도 가능하며 기계적 모델, 수식, 일반적인 이론 등이 모두 가능하다. 해킹은 패러데이 효과(Faraday effect)를 예시로 사변의 의미를 설명하는데, 물리학자 패러데이가 일으킨 현상을 보고 과학자마다 다양한 사변이 나타났다고 설명한다(p.211). 가령, 켈빈(Kelvin)은 자기장의 물리학적 모델을 제시하였고, 맥스웰(J. C. Maxwell)은 전자기 이론 안에서 형식적 분석을 위한 대칭 논변(symmetry arguments)을 사용하였으며 로렌츠(H. A. Lorentz)는 전자 이론을 통해 물리적 설명을 제공하였다. 이처럼 해킹은 현상을 표상하는데 다양한 종류의 사변들이 존재하고 있음을 설명한다. 해킹은 때때로 로렌츠의 전자 이론과 같은 연역적인 힘을 가지는 거대한 사변이 올 수 있음을 인정한다. 그러나 대다수의 경우에는 광범위한 범위의 관념과 유비가 출현한다고 주장하며, 사변은 실험을 통해 실질화 되어 점점 더 만족스러운 이론으로 정식화 된다고 주장한다.

2. 연산

뉴턴의 공식 $F=ma$ 와 관련된 실험을 생각해보자. 우리는 나무토막을 일정한 높이에서 떨어뜨리거나 수평에 놓인 사물에 일정한 힘을 가했을 때의 단위시간당 이동거리를 측정하는 실험을 떠올리게 된다. 그렇다면, ‘암세포는 전이능력(metastatic ability)이 뛰어나다’라는 명제와 관련된 실험은 어떠한가? 암세포는 정상세포에 비해 이동능력이 뛰어나서 타기관으로 전이가 된다는 사실은 잘 알려져 있지만, 종양 생물학 전공자가 아닌 사람이 질문에 답하는 것은 어려운 일이다. 위의 예시에서 알 수 있는 사실은 무엇일까? 물리학과 생물학이라는 학문의 특성과 이론의 수준에 따른 차이가 분명히 존재하겠으나 이론으로부터 실험을 연역하기란 좀처럼 쉽지 않다는 사실이다. 우리는 학습을 통해서 $F=ma$ 와 관련된 여타의 실험들을 이미 배웠고, 그것이 너무 익숙해서 마치 $F=ma$ 에서 나무토막과 관련된 실험이 연역된 것처럼 느껴지는 것이다. 그러나 $F=ma$ 라는 이론만으로 실험을 연역하는 것은 매우 어려운 일이다. 이것이 해킹이 과학적 활동에서 연산을 제안한 이유이다.

해킹은 대부분의 최초의 사변들은 현상과 맞물리지 않는다고 주장하면서, 원리적으로 시험가능한 명제조차도 때때로 실험적 시험이 불가능한 점을 지적한다(p.214). 해킹의 주장으로 이것은 어떻게 수행해야할 지를 모르기 때문이며 새로운 실험적 착상과 그와 관련된 기술이 요구되기 때문이다(p.214). 해킹은 연산을 ‘사변을 수학적으로 변형하여 그것을 세계와 더 밀접하게 일치시키는 것’으로 정의하며 구체적인 예시로 뉴턴(I. Newton)과 라플라스(P.-S. Laplace)를 든다. 즉, 뉴턴이 행성의 운동을 이해하기 위해 미분법을 발명했던 것이나 뉴턴이 남긴 천체의 운동에 대한 이론을 수학적으로 통합하거나 발견시킨 것을 연산의 전형적인 예라고 말한다. 해킹의 자신이 제안한 연산의 정의 자체는 모호하며 자신도 그 의미를 정확하게 표현하기

어렵다고 밝히었는데(Hacking, 1991), 아래의 인용문으로 짐작컨대 이론과 실험의 교차점을 만드는 작업을 뜻하는 것으로 보인다. 다만, 연산의 과정은 실험보다는 이론적 작업을 통해 현실과 맞물리게 하는 것에 초점이 맞추어진 것으로 보인다.

나는 여기서 원하는 말이 정확히 무엇인지는 확실하지 않지만, ‘분석(analysis)’이 ‘연산(calculation)’보다 나올 것 같다. 그러나 이것은 분석만큼 자주 종합되는 것을 의미한다. 계산(computation)을 정확한 규칙과 기술, 심지어 알고리즘을 통해 답을 얻는 것으로 제한하겠다. 반면, 연산이라고 함은 더 포괄적인 의미로 많은 응용 수학을 포함한다. 이것은 기존 이론을 변형하여 연산을 수행하고 이론과 실험 간의 교차점을 생각할 수 있는 형태로 만들어내는 것을 포함할 것이다. 나의 ‘연산’은 쿤(Kuhn)이 ‘이론의 체계화(articulation)’라고 하는 것 중 하나이다(Hacking, 1991).

해킹은 그의 책에서 파이어아벤트(P. Feyerabend)의 ‘과학이 뭐 그리 대단한가?’라는 질문에 과학은 두 가지 능력, 추론적 능력(사변과 연산)과 실험적 능력의 연맹 때문에 대단하다고 밝힌다(p.248). 그의 관점으로 사회과학(social science)은 사변, 연산, 그리고 실험의 협력을 결합하고 있으며, 이것이 과학이 특별한 이유이다. 해킹은 사회과학이 이론적 존재자를 좇아 사변에만 몰두하거나, 근거론(dogmatics)과 경험주의(empirics)에 빠져 실험에만 몰두하고 있는 것으로 해석하며 이것이 과학과의 큰 차별점이라고 주장한다. 해킹은 과학과 타학문의 차별점을 사변가, 연산가, 실험가의 협력을 통해 안정된 현상(stable phenomena)을 만드는 것으로 보는 것이다. 이런 맥락에서 연산은 좁은 의미의 교역지대(trading zone)⁶⁾로서 과학의 발달이 이론과 실험 어느 것 하나에 의존적인 것이 아니라 둘 사이의 맞물림의 중요성을 강조한 개념이라고 할 수 있다.

3. 실험하기

가. 현상의 창조

실험의 한 역할은 너무 무시되어 이름조차 없다고 말할 수 있다. 나는 그것을 ‘현상의 창조(creation of phenomena)’라고 부른다. 전통적으로 과학자들은 자연에서 발견한 현상을 설명한다고 한다. 그러나 나는 종종 그들이 현상을 창조하고 이 현상이 이론의 중심 요소가 되는 경우가 많다고 말한다(p.220).

해킹은 실험이 현상을 창조하는 과정이라고 말한다. 그동안 과학사, 과학철학에서 다루어지는 자연현상은 주로 자연 속에 숨겨져 있다가 과학자들에 의해서 발견되거나 이론에 의해 해석되는 것이었다. 그러나 해킹은 이러한 독트린(doctrine)을 뒤집고 우리가 그간 ‘발견’ 또는 ‘구제’했다고 말하는 현상의 의미를 다시금 정의할 것을 요청한다. 해킹은 과학적 의미에서 ‘현상’을 주목한다. 과학에서 ‘우리가 의미 있는 현상을 발견했다’에서 말하는 ‘현상’의 의미는 현상학(phenomenology)에서 말하는 ‘현상’과 달리 객관적이고 재현 가능한

6) 갤리슨(P. Galison)은 『Image and Logic (Galison, 1997)』에서 교역지대(trading zone)이라는 용어를 제안하였다(Galison, 1997). 갤리슨에 따르면 교역지대는 상이한 학문 그룹이나 분야가 협력 및 이해를 촉진하기 위한 공간으로 다양한 전문 용어, 개념, 관습, 관점 등이 상호작용을 이루는 곳이다. 갤리슨은 이를 교역지대를 통해 과학적 협력의 이해와 복잡성에 대해 주장하였다.

것들이다. 마치 물리학에서 광전 효과(photoelectric effect), 홀 효과(Hall effect)와 같이 ‘~효과(effect)’라고 부르는 것과 의미가 동일하다는 것이다. 해킹은 적어도 과학에서 현상은 주목할 만하고 식별이 가능한 규칙성을 가질 때에만 ‘현상’이라고 부른다는 것이다(p.224).

그렇다면 일정한 규칙을 보이는 현상을 ‘창조’한다는 것은 무엇을 뜻하는가? 우리는 실험이 자연현상을 그대로 실험실로 옮겨와 수행하는 작업이라고 생각하기 쉽다. 그러나 해킹은 현상이라고 부르는 사건들은 자연 그 어디에도 존재하지 않는 배치 상태를 만드는 것이라고 말한다. 즉, 복잡하게 얽혀 있는 수많은 현상들 사이에서 원하는 현상만을 순수하게 정제할 것이라는 주장이다. 예를 들어, 진공상태에서 갈릴레이의 자유낙하 실험을 수행하는 경우를 생각해보자. 지구 어디서나 존재하는 지구의 중력을 시험한다는 점에서 자연 현상을 그대로 옮겨와 수행한다고 생각하기 쉽다. 하지만 공기가 제거된 상황은 자연 그 어디에도 존재하지 않는 배치를 만든 것이다.

특히 해킹은 현상이 드물게 나타난다는 사실에 주목함으로써 현상이 창조되는 과정을 설명한다. 해킹은 이와 관련된 두 가지의 사례를 제시한다.

[A] 우리 대학에는 세계에 몇 대만 있는 매우 복잡하고 비싼 장비 X를 보유하고 있다. 이 장비는 일 년 전에 예약을 하고, 연구를 수행하기 전에 수많은 심사자들에게 의해 심사를 거쳐야만 사용할 수 있다. 우리 기관의 젊고 유망한 과학자 A는 장비 X를 사용하여 매우 두드러진 결과를 얻고 있다. 반면, 동일한 분야에 경험 많은 타기관의 과학자 B는 이들 동안 장비를 사용하였지만 아무것도 얻지 못하고 떠났다. 그는 심지어 A의 연구 결과를 면밀하게 검토할 것을 다른 이들에게 요청하기도 하였다. A는 그가 주장하는 대로 결과를 얻고 있는 것이 맞는가? 아니면 부정행위를 하고 있는 것인가?(p.230)

[B] 실험이 포함된 과목의 ‘강의평가’에서 가장 흔한 의견 중 하나는 실험이 되지 않는다는 것이다. 숫자를 조작해야 하며, 반응이 이루어지지 않거나 바이러스가 성장하지 않는다고 한다. 실험을 개선해야 한다는 의견이 많다(p.230).

사례 [A]는 실제 해킹이 경험한 사례로 과학계에서 흔히 일어날 법한 사례이다. 사례 [A]에서 과학자 B는 과학자 A보다 더 많은 지식과 경험을 가지고 있음에도 제한된 사용 시간과 도구 사용으로 어떠한 과학적 현상도 얻지 못하고 돌아갔다. 분명 B가 더 많은 이론과 경험을 가지고 있음에도 장비 X를 사용할 기회가 제한적이라면 좋은 결과를 산출해낼 수 없는 것이다. 즉, 우리가 과학적 현상을 이론에 비추어 구체해낸다고 말하지만, 실상은 도구쓰기를 통해 만들어지는 것이라는 사실을 깨닫게 해준다. 사례 [A]를 통해 과학자가 도구를 통해 현상을 창조하고, 정제하고, 안정화하기 전까지는 구체할 어떠한 현상도 만들어지지 않는다는 사실을 잘 보여준다.

사례 [B]는 사례 [A]보다 더 직관적으로 현상이 창조된다는 관점을 설명해준다. 실험실에서 실험을 해본 경험이 있는 사람이라면 교과서에서 보던 실험 결과를 똑같이 얻는 것이 참으로 어렵다는 사실을 알고 있을 것이다. 실험에 관련된 여타의 이론과 방법 그리고 도구를 가지고 있음에도 때로는 결과가 아예 산출되지 않기도 하며, 모호한 데이터를 얻기도 한다. 그러나 놀랍게도 같은 실험을 반복할수록 정제된 데이터가 추출되고, 결과가 나오지 않는 경우를 찾기 힘들어진다. 사례 [B]는 우리가 현상을 구체하기 위한 이론적 지식과 방법,

그리고 특징을 알고 있음에도 그것만으로는 쉽게 현상을 발견할 수 없다는 사실을 알려준다. 즉, 실험에서 안정적인 현상을 얻기 위해서는 지식이나 방법뿐 아니라 우리가 노하우라고 부르는 암묵적 지식이 필요함을 보여주는 것이다.

앞선 두 사례를 요약하면, 현상은 이론에 의해서만 만들어지는 것이 아니며 다양한 재료와 도구, 과학자의 직감, 스킬과 같은 요소들이 어우러짐으로써 만들어지는 것이다. 물론 때때로 현상은 이론에 의해서 지시될 때도 있을 것이다. 하지만 해킹은 이론에 의한 지시보다 과학자의 개입(intervening)에 의해 만들어지는 현상에 주목한다. 이것이 그가 현상의 창조라는 표현을 사용하는 이유이다.

나. 개입하기와 조작하기

해킹의 과학 활동의 세 구도는 전통적인 가설-연역적 구도와 크게 다르지 않게 보이기도 한다. 해킹의 세 구도는 기존의 가설-연역적 방법에서 가설을 사변과 연산이라는 개념으로 양분하고, 실험의 중요성을 강조하는 확장된 과학적 방법처럼 이해될 우려가 있다. 해킹 또한 연산이 때로는 과학 교과서에서 보게 되는 깔끔한 가설-연역적 구도를 만들기도 한다고 언급한다. 그러나 해킹은 자신의 주장이 과학 활동을 어떠한 개념으로 분류하거나 새롭게 과학적 방법을 만들고자 하는 행위가 아님을 강조한다. 그렇다면 해킹의 세 구도는 어떤 철학적 의의가 있는가? 그에 대한 답은 앞서 논의한 ‘실험의 자율성’, 구체적으로는 ‘개입하기’와 ‘조작하기(manipulation)’에 있다. 해킹을 과학 지식이 실험을 통해서, 정확히는 과학자의 개입을 통해서 만들어지는 것으로 보았으며 현상을 조작함으로써 자연에 대해 알게 된다고 보았다. 예를 들어 누군가 ‘어떻게 전자(electron)의 존재에 대해 알게 되었는지’ 질문을 던진다면, 톰슨의 음극선 발견, 밀리컨의 기름방울 실험과 같은 전자와 관련된 여타의 실험들과 여러 버전의 양자론을 떠올릴 수 있을 것이다. 그러나 곧 우리가 전자의 존재를 믿게 된 것이 과연 음극선의 발견이나 밀리컨의 기름방울 실험과 같은 여타의 결정적인 실험(crucial experiment)이었는지 질문을 던질 수 있을 것이다.

주지하다시피 결정적 실험은 뒤엎(P. Duhem)과 라카토슈(I. Lakatos) 그리고 쿤(T. S. Kuhn)에 이르기까지 존재하지 않는 것으로 주장되어왔으며(Hacking, 1983; Kuhn, 2012; Lakatos, 2014; Lee, 2002), 최근에는 과학 지식이 사회적 요인에 의해 결정된다는 논의에 이르러 되었다. 그런데 해킹은 이러한 관점이 지나치게 형이상학에 감염되어 있다고 비판하며 조작하기를 통해 과학 지식의 실재성이 드러난다고 본다. 즉, 해킹은 과학자가 전자를 이용하여 도구를 만들고, 그 도구를 통해 다른 현상들을 탐구할 때 전자에 대해 안다고 말한다. 구체적으로 과학자는 전자와 관련된 도구를 설계할 수 있을 것이다. 그러나 이러한 도구를 만들 때 사용되는 지식은 전자의 실재성과 직접적으로 연결되지 않고, 일상적인 진리에 의해 작동하게 될 것이다(p.265). 그리고 과학자는 이러한 도구를 사용하면서 발생하는 수많은 버그(bugs)를 해결하는 과정을 통해 전자에 대해 알게 된다는 것이다.

해킹은 전자 발사 장치(polarizing electron gun)인 PEGGY II를 만드는 과정을 대표적인 예시로 든다. PEGGY II는 약한 중성 상호작용에서 패리티 위반(parity violation)을 시험하기 위해 고안된 장치로,

다량의 극화된 전자가 방출되는 장치이다. PEGGY II는 원형으로 극화된 광자를 갈륨비소(Gallium Arsenide, GaAs)에 쏘면 극화된 전자가 다량으로 방출되는 구조로 되어있는데, PEGGY II를 만드는 과정에는 수많은 버그를 해결하는 디버깅(debugging) 과정이 있었다. 이때의 디버깅 과정은 ‘무엇이 잘못되었는지’, ‘왜 그런지’를 이론적으로 설명하고 수정하는 것이 아니라 공학적 실천을 통해 장치내의 잡음(noise)을 제거하는 일이었다. 가령, 다량의 전자를 발생시키기 위해 장치를 낮은 온도로 조정하는 일, 적절한 레이저 파장을 선택하는 일, 장치를 진공 상태로 유지하는 일, 방출된 전자를 타겟으로 이동시키는 일 등을 이론적으로 해석하고 해결하는 것이 아닌 수많은 시행착오를 통해 경험적으로 해냈다. 해킹은 바로 이 지점. 경험적으로 전자를 조작하게 된 시점에서 전자에 대해 알게 되었다고 표현한다. 과학자는 부분적이고 이질적인 이해의 방식, 즉 낮은 수준의 인과적 성질을 이용하여 전자를 자유자재로 조작할 수 있게 되었고, 그러므로 전자에 대한 믿음과 실재성을 가지게 되었다는 것이다. 따라서 해킹은 실재성을 조작 가능성으로 대체하여 바라보며, 과학 활동에서 이론이 아닌 실천에 대해 생각할 것을 강조한다.

이론에 대해 생각하지 말고, 실천에 대해 생각하라(p.274).

이상으로 해킹의 과학활동의 세 가지 구도-사변, 연산, 실험하기를 살펴보았다. 해킹은 실험에 대한 이론 지배적인 관념을 벗어나 과학자의 개입에 의해 만들어지는 안정된 현상에 주목하였다. 해킹의 논의의 가장 큰 의의는 과학활동의 중심을 이론에서 현상으로 옮겨갔다는 것이며, 이론에 무관하게 개입과 조작을 통해 드러나는 현상을 탐색했다는 데 의의가 있다. 물론 이러한 해킹의 철학적 논증은 또 다른 기적 금지 논변(No Miracle Argument, NMA)의 일종이라고 비판되기도 하는 등 비판과 반론이 다수 존재한다(Gelfert, 2003; Resnik, 1994; Shapere, 1993). 하지만 그동안 간과된 실험의 의미를 재고함으로써 실험철학이라는 새로운 테제를 열고, ‘실험’에 대한 새로운 시각을 제공한 것에 큰 의의가 있을 것이다.

IV. 현상중심 관점의 과학 교육적 함의

서론에서 문제를 제기하였듯이 학교에서 수행되는 실험교육은 주로 이론 지배적인 관점 하에서 수행된 것으로 보인다. 비록 최근에는 실험의 목적에 대한 교사와 학생의 인식 조사를 토대로 다양한 실험의 목적과 역할을 재고해야 한다는 연구가 수행되었으나(Joung, Jang, & Kim, 2011a, 2011b; Kim, & Song, 2003; Kim, Kim, & Yang, 2019; Stroupe, 2015; Wei & Li, 2017; Yang & Cho, 2005) 여전히 현장에서는 실험을 이론이나 지식의 증명이나 확인하는 수단으로 인식하는 경우가 많았다(Abrahams & Reiss, 2012; Kim, Kim, & Yang, 2019; Stroupe, 2015). 어쩌면 이것은 학생들에게 이미 잘 정립된 과학 지식을 가르쳐야 하는 교육의 맥락 하에서는 필연적인 결과일지도 모른다. 그러나 최근 과학교육에서 추구하는 인재상이 단순히 지식을 많이 알고 있는 학생이 아닌 민주사회의 시민으로서 개인과 사회의 문제를 해결하고 참여하는 역량을 기르는 데 있다는 것(MOE, 2022; Song et al., 2019)을 염두에 둔다면 과학실험의 목적과 역할 또한 다양화될 것이 요구될 것이다. 이러한 맥락에서 해킹의 철학적 관점

은 이론 지배적인 관점을 벗어나 실험의 다양한 모습을 숙고하는 데 도움을 준다. 구체적으로 해킹의 관점에 따르면, 실험은 과학자의 개입을 통해 규칙적이고 식별 가능한 현상을 만드는 과정을 의미한다. 따라서 이론에 의해 지시되거나 이론을 생성하는 실험의 모습보다는 과학자의 개입하기를 통해 현상을 만드는 활동에 초점을 둔다. 또한, 과학자는 현상을 안정적으로 다룰 수 있을 때, 비로소 현상의 실재성을 깨닫게 되는 것으로 본다. 연구자는 이러한 해킹의 관점을 기존의 실험과 대비하여 ‘현상중심의 실험(phenomena-based experiments)’라 부를 것을 제안하는 바이며, 해킹의 현상중심의 관점을 통해 다음과 같은 과학 교육적 함의를 도출할 수 있을 것으로 본다.

첫째, 현상중심의 실험을 통해 실험의 자율성을 인정함으로써 그동안 상대적으로 간과되었던 도구, 재료, 암묵지를 포함한 과학자의 개입과 같은 요소들을 주목할 수 있게 된다. 구체적으로 해킹의 관점의 주요한 특징 중 하나는 실험을 이론(지식)중심적 사고에서 현상 중심적 사고로 옮겼다는 데 있다. 가령 마이컬슨-몰리(Michelson-Morley)의 간섭계 실험의 경우, 기존의 실험관에서 주요하게 다루어지는 내용은 ‘에테르(aether)와 관련된 프레넬(A. J. Fresnel)과 스토크스(G. G. Stokes) 사이의 결정적 실험’ 또는 ‘아인슈타인의 광속불변의 법칙에 영향을 주었다는 내용’일 것이다. 따라서 학생들은 프레넬 이론과 스토크스의 이론의 설명력에 대해서 학습하며, 실험은 오직 심판자로서 그 결과만을 취하게 될 것이다. 그러나 해킹의 현상중심의 관점에 따르면, 마이컬슨의 실험적 목표는 ‘맥스웰이 불가능하다고 주장했던 에테르에 대한 지구의 운동을 어떠한 이론에도 제한 받지 않고 순수하게 측정하는 것(p.257)’이다. 따라서 현상중심의 관점에서는 현상을 안정적으로 창조하기 위해 사용되는 간섭계(도구)와 과학자의 판단이 중요하게 드러날 것이다. 구체적으로 마이컬슨이 자신의 실험 결과를 최초로 보고한 시점(1881년)부터 물리학자 몰리(E. Morley)와 협업을 통해 ‘마이컬슨-몰리 실험’의 결과를 발표하는 시점(1887년)까지 실험의 결론은 늘 동일했던 것을 알 수 있다. 하지만 그럼에도 마이컬슨은 7년의 시간 동안 자신의 간섭계를 끊임없이 수정하고 개선하는 작업을 진행한 것을 알 수 있다(Hacking, 1983; Lee, 2008). 비록 간섭계의 발전과정을 정확히 추적하기 어렵지만, 1887년에 발표된 간섭계는 1881년의 간섭계에 비해 반사경의 개수가 두 개씩 늘어나고, 거울의 배치가 달라졌으며, 진동을 제거하기 위해 주형물과 수은이 채용되었음을 알 수 있다(Lee, 2004). 만약 실험의 과정을 단순히 이론을 중심으로 생각한다면, 마이컬슨의 7년의 실험 과정은 그 기간에 비해 크게 의미가 없는 행동으로 비쳐질 수 있다. 하지만 현상중심적 관점에서는 마이컬슨이 실험을 수행하면서 고려했던 여타의 요소들(도구, 재료, 도시의 공해, 소음 등)과 과학자의 판단과 개입이 중요하게 드러날 수밖에 없는 것이다. 물론 현 실험교육에서 재료와 방법 그리고 노하우의 중요성이 완전히 배제된 것은 아니다. 하지만 실험 목표로 제시되는 이론의 학습에 비해 그 중요성이 상대적으로 간과되었다고 할 수 있으며, 현상중심의 실험은 잠재적으로 다루어졌던 요소들을 전면으로 등장시킬 수 있다는 데 의의가 있다.

둘째, 과학적 모델의 의미를 이해하고 사용하는 데 도움을 줄 것으로 기대한다. 미국의 NGSS에서 과학적 실천(science practice)의 모습 중 하나로 모델을 개발하고 사용하는 것을 제안한 바 있다(Council, 2013). 과학적 실천에서 모델의 중요성이 강조되는 것은 모델링이 과학 활동의 중심이며(Bailer-Jones, 2009; Giere et al., 1991), 자연은

어떤 이론 하나로 귀결되는 것이 아닌 세계에 대한 다양한 표상이 복합적으로 겹치거나 소멸되기 때문이다(Lee *et al.*, 2023). 이에 과학 교육에서는 학생이 모델을 스스로 구성하고, 평가하고, 다시 재구성하는 과정의 순환의 반복(Clement, 2008; Rea-Ramirez *et al.*, 2008)을 중요하게 다루어왔다. 그러나 최근에는 현상이나 데이터의 생성과정(Kim *et al.*, 2022a, 2022b)과 암묵적 지식을 포함한 모델의 복잡성(Lee *et al.*, 2023)을 반영해야 한다는 반성적 목소리가 있었는데, 이는 해킹이 과학적 활동의 세 구도를 통해 실험에서 현상을 귀납 혹은 연역이라는 일방향적인 구도로 다루었던 모습을 비판한 것과 맥락을 같이한다고 할 수 있다. 즉, 모델링 활동이 단순히 이론에 의해 생성되거나 이론을 만들어가는 기계론적 관점에 국한할 것이 아니라 구체적인 현상을 해석하기 위한 활동으로 이론으로부터 자율적인 실험모델의 의미나 그 과정에서 암묵적 지식까지 확장할 필요성을 제기한 것이다(Bailer-Jones, 2009; Giere *et al.*, 1991; Lee *et al.*, 2023). 또한, 해킹은 자신의 연산의 과정을 카트라이트(N. Cartwright)가 『How the laws of physics lie (1984)』에서 설명한 모델세우기(model-building)와 일면 유사성을 공유함을 밝혔기도 하였는데(p.215), 이론과 별개로 현상을 해석하기 위해서 모델의 자율성과 증증적 구조를 이해하는 과정은 해킹이 제안한 세 구도와 유사성을 공유하므로 이론 모델, 데이터 모델, 실험 모델과 같이 다양한 구도로 이해하고 사용하는데 도움을 줄 것으로 보인다.

셋째, 현상중심의 실험은 과학의 본성을 고려한 자유로운 탐구를 가능하게 한다. 일반적인 실험교육 상황에서 학생들은 객관적인 관찰과 측정을 수행하며, 수집된 데이터를 바탕으로 객관적이고 논리적인 결론을 도출하기를 요구된다(Hodson, 1996b; Lunetta *et al.*, 2013). 이것은 과학이라는 교과에서 당연히 요구되는 과학적 태도이겠으나 과학의 본성에서 언급되는 사회·문화의 영향이나 과학자 간의 합의, 관찰의 주관성 등이 개입할 여지가 없이 실증주의 내지는 소박한 귀납주의적 관점만이 강조될 우려가 있다. 만일 실험을 가르치는 교사의 입장에서 과학의 본성을 고려하여 실험의 과정과 결과를 열어놓을 경우 실험의 목표로 삼은 지식이나 과학적 방법이 무의미해질 수도 있기 때문이다. 따라서 과학교사는 통제된 절차와 방법을 통해 교과서와 동일한 결과를 얻는 것을 추구하는 기계적 객관성을 지향하게 되고(Shin, Lee, & Ha, 2016), 실험은 요리책식 실험으로 변질될 우려가 있는 것이다.

하지만 현상중심의 실험에서는 현상을 안정적으로 창조하는 것이 목표로 제시되고, 그 과정을 수행하기 위해 과학자의 개입이 중요하게 작용하는 것으로 인식되므로 다양한 방법과 절차, 그리고 결론을 수용해줄 여지를 제공해준다. 즉, 일반적인 실험수업 상황에서는 이론이 지시하는 현상을 예시하기(illustrate) 위해서 주어진 절차와 과정을 엄격하게 지켜 실험을 성공시키는 것이 중요하다면, 현상중심의 실험에서는 현상을 안정적으로 만들어내기 위해 실험자의 개입이 필연적이므로 주어진 절차와 과정보다는 실험자의 직관과 판단이 강조될 수 있는 것이다. 구체적으로 Yoon (2008)의 연구에서 다른 ‘식물의 잎 관찰 실험’ 사례를 살펴보면, 교사는 교과서에 제시된 방법대로 커터칼과 핀셋을 이용하여 식물의 표피를 벗겨내는 것을 안내하였다. 그런데 학생들은 핀셋으로 벗겨내는 일에 계속 실패하게 되고, 한 학생이 손톱으로 벗겨내는 일에 여러 차례 성공하자 교사는 학생의 방법과 교과서의 방법 사이에서 같등하게 되는 교사의 모습이 그려진

다. 공인된 과학적 방법과 학생의 방법이라는 같등 상황에서 만일 교사가 현상중심의 관점을 수용한다면, 학생의 방법에 대한 정당성을 고민하는 것이 아니라 학생들에게 공유하고, 이를 평가할 수 있는 기회로 삼을 수도 있을 것이다.

또한, 현상중심의 관점은 실험교육 지도의 어려움으로 종종 지적되는 예상치 못한 결과를 조우했을 때에도 학생들을 과학적 실천으로 이끌 수 있는 여지를 제공한다. Cho, Choi, & Yoon (2023)의 연구에서는 예비교사가 일반적 상황에서 ‘과학적 실천’을 지향하는 것으로 나타났으나, 실제 예상과 결과가 불일치하는 상황에서는 ‘개념 이해’를 지향하는 것으로 나타났다. 이처럼 실제 교실 상황에서 불일치 상황이 발생했을 때, 당황하며 이론적 지식에 대한 설명을 강화하거나 상황에 적절하게 대처하지 못하는 일들이 종종 발생한다(Nott & Smith, 1995; Yoon, 2008). 그러나 이러한 불일치 상황 속에서 교사가 현상중심의 실험관을 차용하고, 학생들에게 현상을 안정적으로 창조할 것을 권장한다면 앞서 설명한 ‘식물의 잎 관찰 실험’의 사례와 마찬가지로 실패되었다고 간주된 현상을 학생들에게 공유하고, 평가 및 재해해 볼 수 있는 좋은 탐구 사례로 자리 잡을 수 있는 것이다. 실제로 불일치 상황에 대한 교사의 인터뷰를 담은 선행 연구(Kim, Kim, & Yang, 2020; Park, Chang, & Song, 2016; Yoon, 2008)를 살펴보면 교사들은 실험 결과가 예상과 달라진 이유를 찾아보고 이를 학생들이 토론하는 것이 과학적 태도 및 문제해결 능력 증진에 도움이 된다고 밝힌 바 있는데, 이러한 교수실행이 현상중심의 실험관에서 보다 자연스럽게 수행될 수 있을 것으로 보인다.

마지막으로 실험을 통해 가르쳐야 하는 과학지식의 의미를 재고하게 한다. 실험수업을 수행하면서 교사가 가지는 가장 일반적인 기대는 학생들이 실험을 통해 과학의 이론과 법칙을 시각화함으로써 과학 지식에 대한 이해를 촉진시킬 수 있을 것이라는 기대이다. 이러한 인지적(cognitive) 주장은 학교실험수업을 수행하는 데 가장 큰 원동력이 되었고, 따라서 학교실험교육은 학생들에게 체험을 통한 자연 현상에 대한 실제적인 경험을 제공하고자 하였다(Millar, Tiberghien, & Le Maréchal, 2002; Woolnough, 1983). 특히, 관찰실험이나 확인실험과 같은 예시적인(illustrative) 성격의 실험들은 학생들에게 과학적 현상을 노출시킴으로써 이미 잘 정립된 과학지식을 더 잘 이해하기 위한 시도였다고 해석할 수 있다. 하지만, 해킹이 소개한 PEGGY II의 사례는 ‘우리가 무언가를 안다’는 것이 단순히 이론을 듣고 보는 것만으로는 충분하지 않을 수도 있다는 사실을 깨닫게 해준다. 즉, 우리가 실험을 통해 과학지식을 학습한다고 했을 때, 단순히 과학적 현상을 확인하는 것을 넘어 실험과정에서 개입하기와 조작하기를 통해 실천적인 앎의 과정이 필요하다는 것이다.

이러한 실천적 앎의 중요성은 해킹뿐 아니라 여러 철학자들에 의해서 지속적으로 제기되어왔다. 가령 라투르(B. Latour)는 확립된 과학과 진행 중인 과학(science in making)을 구분함으로써 과학지식이나 법칙이 정립되기까지의 실천적인 작업을 강조한 바 있으며(Latour & Woolgar, 2013), 장하석은 18세기 화학혁명을 예시로 과학의 복잡성을 언급하며 과학에 대한 구체적이고 실천적인 감각이 필요함을 주장하였다(Chang 2012, 2014). 이러한 주장들을 종합해봤을 때, 학교실험교육에서 목표로 하는 지식을 단순히 이론의 표상에 한정할 것이 아니라 과학자의 실천적인 작업까지 확장하고, ‘실험이 작동하고 있는 때(p.230)’를 알려줄 필요성이 제기되는 것이다. 따라서 만일

실험교육에서 실험을 통해 가르칠 수 있는 지식의 의미를 재고하여 자연에 대한 표상과 함께 실험자의 개입과 조작의 과정을 포함시킨다면, 단순히 지식의 깊이뿐 아니라 과학 활동에 대한 총체적인 이해를 제공해줄 수 있을 것이다.

V. 나가며

본 논문에서는 1980년대에 등장한 실험철학의 대표 학자인 이언 해킹의 철학적 관점을 간략하게 소개하고, 해킹의 철학적 관점이 실험교육에 미칠 교육적 함의에 대해 논의하였다. 비록 본 논문에서는 해킹의 철학의 핵심적인 키워드인 존재적 실재론(entity realism)에 대한 구체적인 언급과 실재론적 논쟁에 대한 자세한 기술하지는 않았으나 본 논문에서 주요하게 다룬 실험의 자율성과 과학하기의 세 구도는 존재적 실재론을 직접적으로 언급하지 않아도 해킹의 핵심적인 철학적 쟁점을 지시한다고 할 수 있다.

본 논문은 그동안 간과되었던 이론이나 과학 지식으로부터 자율적인 실험의 모습을 조명하는 데 의의가 있을 것으로 보인다. 본 논문은 ‘실험의 자율성’이라는 이름이 함축하듯이 이론으로부터 독립적인 실험의 성격을 논하는 것은 아니며, 과학교육에서도 마찬가지로 이론으로부터 연역된 실험이 가치가 없음을 주장하는 것은 아니다. 다만 초등학교에서 중학생으로, 중학생에서 고등학생으로 점차 학년이 올라감에 따라 이론 지배적인 실험만을 다루는 것은 결코 바람직하지 않을 것임을 주장하는 바이며, 실험의 기능과 역할에 대한 다양한 논의가 수행되기를 촉구하는 바이다.

국문요약

본 연구에서는 이언 해킹(Ian Hacking)의 실험 철학에 대한 철학적 관점을 탐구하고 이 관점이 학교 실험 교육에 미칠 영향에 대한 논의 하였다. 그간 다수의 철학자들은 실험이 이론을 검증할 때에만 중요하다는 이론 선행적인 관점을 주장하였다. 이와 마찬가지로 학교 교육에서도 실험의 주요 목적은 이론의 확인과 입증에 초점을 맞춘 관점이 주류를 이론 것으로 보인다. 그러나 이러한 이론 선행적인 관점은 대조적으로 해킹을 포함한 실험 철학자들은 실험 자체가 자율성과 생명력을 갖는다는 주장을 제안하였다. 해킹은 개입하기와 조작하기를 통해 실험의 이론 자율적인 성격을 강조하면서 실험에서 그동안 상대적으로 간과되었던 도구 사용, 재료, 과학자의 숨씨와 같은 요소들의 중요성을 강조하였고, 과학 활동에서의 실험의 역할과 그의 중요성을 재고하였다. 본 연구에서는 이러한 철학적 입장이 학교 실험 교육에도 적용할 수 있는 것으로 보았으며, 본 연구에서 제시하는 현상중심의 관점을 통해 도구 사용, 실험자의 개입, 모델링 활동과 같은 과학적 실천을 가르치는 데 도움이 될 것으로 예상된다.

주제어 : 이언 해킹, 현상중심 실험, 실험교육, 현상의 창조, 개입하기, 조작하기

References

Abrahams, I., & Reiss, M. J. (2012). Practical work: Its effectiveness in

primary and secondary schools in England. *Journal of Research in Science Teaching*, 49(8), 1035-1055.

Ackermann, R. (1989). The new experimentalism. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 40(2), 185-190.

Armstrong, H. E. (1910). *The teaching of scientific method and other papers on education*. London: Macmillan.

APSNews. (2002). June 1963: Discovery of the Cosmic Microwave Background. *APSNews*. Retrieved from <https://www.aps.org/publications/apsnews/200207/history.cfm>

Bacon, F. (1620). *Novum organum* (Kim Hong Pyo, Trans.). Combooks.

Bailer-Jones, D. M. (2009). *Scientific models in philosophy of science*. University of Pittsburgh Pre.

Barman, C. R. (1999). Completing the study: High school students' views of scientists and science. *Science and Children*, 36(7), 16-21.

Boylan, C. R. (1992). Beyond Stereotypes. *Science Education*, 76(5), 465-476.

Cartwright, N., & McMullin, E. (1984). How the law of physics lie.

Chambers, D. W. (1983). Stereotypic images of the scientist: The draw-a-scientist test. *Science Education*, 67(2), 255-265.

Chang, H. (2012). *Is water H2O?: Evidence, realism and pluralism* (Vol. 293). Springer Science & Business Media.

Chang, H. (2014). *Science Meets Philosophy*. Jisikplus.

Cho, E., Choi, C. I., & Yoon, H.-G. (2023). Pre-service Elementary Teachers' Orientation toward Scientific Inquiry Teaching: Focusing on the Anomalous Situation. *Journal of Korean Elementary Science Education*, 42(2), 211-226.

Choi, J., & Jeon, S.-H. (2022). Implications of the 'Sontanda' Phenomenon of Scientists for Science Education: Focusing on Ian Hacking's Creation of Phenomena. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 42(2), 253-264.

Clement, J. J. (2008). Student/teacher co-construction of visualizable models in large group discussion. In *Model based learning and instruction in science* (pp. 11-22). Springer.

Council, N. R. (2013). *Next generation science standards: For states, by states*.

Fung, Y. Y. (2002). A comparative study of primary and secondary school students' images of scientists. *Research in Science & Technological Education*, 20(2), 199-213.

Galison, P. L. (1987). How experiments end. In *Chicago : University of Chicago Press*.

Galison, P. L. (1997). *Image and logic; A material culture of microphysics*. University of Chicago Press.

Gelfert, A. (2003). Manipulative success and the unreal. *International Studies in the Philosophy of Science*, 17(3), 245-263.

Giere, R. N., Bickle, J., & Mauldin, R. F. (1991). *Understanding scientific reasoning*.

Hacking, I. (1983). *Representing and intervening: Introductory topics in the philosophy of natural science*. Cambridge university press.

Hacking, I. (1991). Speculation, Calculation and the Creation of Phenomena. In G. Munévar (Ed.), *Beyond reason: Essays on the philosophy of Paul Feyerabend* (Vol. 132). Springer Science & Business Media.

Han, S. (2004a). Educational Reflections on Laboratory Experiment in School Science *The Journal of Educational Principles*, 9(1), 47-82.

Han, S. (2004b). Reflection on laboratory experiment in school science in the perspective of endogenous theory of education (Doctoral dissertation). Seoul National University.

Han, S., Choi, S., & Noh, T. (2012). Epistemological Views of Middle School Students on Scientific Inquiry. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 32(1), 82-94.

Hodson, D. (1986). Rethinking the role and status of observation in Science Education. *Journal of Curriculum Studies*, 18(4), 381-386.

Hodson, D. (1996a). Laboratory work as scientific method: Three decades of confusion and distortion. *Journal of Curriculum Studies*, 28(2), 115-135.

Hodson, D. (1996b). Practical work in school science: exploring some directions for change. *International Journal of Science Education*, 18(7), 755-760.

Hong, S. (2020). *The Evolution of the Laboratory*. Gimmyoung.

Huber, R. A., & Burton, G. M. (1995). What do students think scientists look like? *School Science and Mathematics*, 95(7), 371-376.

Huxley, T. H. (1893). *Science & education* (Vol. 3). Macmillan.

Hwang, S. W., (2002). The Role of phenomenon-making activities in learning electromagnetism (Doctoral dissertation). Seoul National University.

Jenkins, E. W. (1980). From Armstrong to Nuffield: Studies in twentieth-century science education in England and Wales. *British Journal of Educational Studies*, 28(1).

Joung, Y.-J., Jang, M.-D., & Kim, H.-J. (2011a). Why do We do Science Experiments? : Scientifically Gifted Children's Views about the Purpose of Science Experiments. *Journal of Korean Elementary*

- Science Education, 30(2), 189-203.
- Joung, Y.-J., Jang, M.-D., & Kim, H.-J. (2011b). Elementary Pre-service Teachers' Views about the Purpose of Science Experiments. *Journal of Korean Elementary Science Education*, 30(2), 255-270.
- Kim, H., & Song, J. (2003). Middle School Students' Ideas about the Purposes of Laboratory Work. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 23(3), 254-264.
- K, H., Park, S.-K., & Kim, Y. (2012). A Comparative study of Middle School Students' Images and Perceptions of Scientist, Technician and Engineer. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 32(1), 64-81.
- Kim, J.-H., Kim, H.-N., & Yang, I.-H. (2019). Review on the Roles of Laboratory Work in School. *Journal of Korean Elementary Science Education*, 38(2), 203-215.
- Kim, J.-H., Kim, H.-N., & Yang, I.-H. (2020). An Analysis on the Recognition of Elementary Teachers about the Role of Science Practical Work at School. *Teacher Education Research*, 59(1), 51-64.
- Kim, J., & Cho, B. (2002). Perceptions about Science and Scientific Activity of Students in Kindergarten and Primary School. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 22(3), 617-631.
- Kim, K.-Y., Lee, J.-H., Choi, J., Jeon, S.-H., & Lee, S. (2022a). Characteristics of Modeling of Experiment in Case Analysis of Students' Open Inquiry and its Meaning on Science Education. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 42(2), 201-214.
- Kim, K.-Y., Lee, J.-H., Choi, J., Lee, H., Jeon, S.-H., & Lee, S. (2022b). Exploring Data Modeling in Scientific Practice - Focusing on Phenomenon Production and Evidencing -. *BIOLOGY EDUCATION*, 50(4), 529-542.
- Kuhn, T. S. (2012). *The structure of scientific revolutions*. University of Chicago press.
- Lakatos, I. (2014). Falsification and the methodology of scientific research programmes. In *Philosophy, Science, and History* (pp. 89-94). Routledge.
- Latour, B., & Woolgar, S. (2013). *Laboratory life: The construction of scientific facts*. Princeton University Press.
- Lee, H., Lee, J.-H., Choi, J., Kim, K.-Y., & Lee, S. (2023). Rethinking the Knowledge Viewpoint in Practice-Oriented Science Education and its Relationship with Scientific Modeling. *Journal of Korean Elementary Science Education*, 42(2), 343-366.
- Lee, S. W. (2002). Two Roles of Experiment: Fact Acquisition and Theory Testing. *CHEOLHAK*, 72, 273-294.
- Lee, S. W. (2004). A philosophical approach to experimentation. *Seokwangsa*.
- Lee, S. W. (2006). Autonomy and Constrained Nature of Experimentation: Various Relations between Theory, Instrument, and Experiment. *KOREAN JOURNAL FOR THE PHILOSOPHY OF SCIENCE*, 9(1), 75-92.
- Lee, S. W. (2008). Not Theory Testing but the Innovation of Experimental Techniques: -Unhierarchical Interrelation between Experiment and Theory-. *Journal of Humanities*, 42, 235-256.
- Lee, S. W. (2011). The Production of Facts and Laboratory Space CHULHAK SA SANG - *Journal of Philosophical Ideas*, 40, 207-238.
- Lee, W., Kim, H., & Song, J. (2008). Secondary School Students' Images of Doing-Science-Well. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 28(1), 1-14.
- Lim, H., & Yeo, S.-I. (2001). Gifted Children's Perceptions of Scientists. *Journal of Gifted/Talented Education*, 11(2), 39-58.
- Lunetta, V. N., Hofstein, A., & Clough, M. P. (2013). Learning and teaching in the school science laboratory: An analysis of research, theory, and practice. In *Handbook of Research on Science Education* (pp. 393-441). Routledge.
- Maoldomhnaigh, M. O., & Hunt, A. (1988). Some factors affecting the image of the scientist drawn by older primary school pupils. *Research in Science & Technological Education*, 6(2), 159-166.
- Matthews, M. R. (1994). *Science teaching : the role of history and philosophy of science*. Psychology Press.
- Millar, R. (2005). What is 'scientific method' and can it be taught? In *Teaching science* (pp. 172-185). Routledge.
- Millar, R., Tiberghien, A., & Le Maréchal, J.-F. (2002). Varieties of labwork: A way of profiling labwork tasks. *Teaching and learning in the science laboratory*, 9-20.
- Morrison, M. (1990). Theory, intervention and realism. *Synthese*, 82(1), 1-22.
- Nott, M., & Smith, R. (1995). 'Talking your way out of it', 'rigging' and 'conjuring': what science teachers do when practicals go wrong. *International Journal of Science Education*, 17(3), 399-410.
- Oh, P. S. (2020). A Critical Review of the Skill-Based Approach to Scientific Inquiry in Science Education. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 40(2), 141-150.
- Park, J., Chang, J., & Song, J. (2016). Why did I Cope with so?: A Teacher's Strategy to Cope with Anomalous Situations in Primary Practical Science Lessons. *Journal of Korean Elementary Science Education*, 35(3), 277-287.
- Rea-Ramirez, M. A., Clement, J., & Núñez-Oviedo, M. C. (2008). An instructional model derived from model construction and criticism theory. In *Model based learning and instruction in science* (pp. 23-43). Springer.
- Resnik, D. B. (1994). Hacking's Experimental Realism. *Canadian Journal of Philosophy*, 24(3), 395-411.
- Sanderson, B. A., & Kratochvil, D. W. (1971). *Science--A Process Approach*, Product Development Report No. 8.
- Shapere, D. (1993). Astronomy and Antirealism. *Philosophy of Science*, 60(1), 134-150.
- Shin, S., Lee, J.-K., & Ha, M. (2016). Pre-service Biology Teachers' Value Orientation Related to Observation and Representation: Focus on Objectivity. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 36(4), 617-628.
- Song, J., Kang, S., Kwak, Y., Kim, D., Kim, S., Na, J., ... Joung, Y. J. (2019). Contents and Features of 'Korean Science Education Standards (KSES)' for the Next Generation. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 39(3), 465-478.
- Stevens, P. (1978). On the Nuffield Philosophy of Science. *Journal of Philosophy of Education*.
- Stroupe, D. (2015). Describing "science practice" in learning settings. *Science Education*, 99(6), 1033-1040.
- The Ministry of Education. (2022). *Science curriculum*. Sejong: The Ministry of Education.
- Turner, D. M. (1927). *History of science teaching in England*. Arno Press.
- Wei, B., & Li, X. (2017). Exploring science teachers' perceptions of experimentation: implications for restructuring school practical work. *International Journal of Science Education*, 39(13), 1775-1794.
- Wellington, J. (2002). *Practical work in school science: Which way now?* Routledge.
- Wong, S. L., & Hodson, D. (2009). From the horse's mouth: What scientists say about scientific investigation and scientific knowledge. *Science Education*, 93(1), 109-130.
- Woolnough, B. E. (1983). Exercises, Investigations and Experiences. *Physics Education*, 18(2), 60-63.
- Woolnough, B., & Allsop, T. (1985). *Practical Work in Science*. Cambridge University Press.
- Yang, I., & Cho, H. (2005). Review on the Aims of Laboratory Activities in School Science. *Journal of Korean Elementary Science Education*, 24(3), 268-280.
- Yoon, H.-G. (2008). Elementary Teachers' Dilemmas of Teaching Science Practical Work. *Journal of Korean Elementary Science Education*, 27(2), 102-116.
- Yoon, J., Park, S., & Myeong, J.-O. (2006). A Survey of Primary and Secondary School Students' Views in Relation to a Career in Science. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 26(6), 675-690.

저자정보

최진현(서울대학교 객원연구원)
전상학(서울대학교 교수)