



과학자의 ‘손탄다’ 현상이 과학교육에 주는 함의 —이언 해킹의 현상의 창조를 중심으로—

최진현, 전상학*
서울대학교

Implications of the ‘Sontanda’ Phenomenon of Scientists for Science Education: Focusing on Ian Hacking’s Creation of Phenomena

Jinhyeon Choi, Sang-Hak Jeon*
Seoul National University

ARTICLE INFO

Article history:

Received 3 February 2022
Received in revised form
2 March 2022
12 April 2022
Accepted 19 April 2022

Keywords:

Ian Hacking, creation of phenomena, Sontanda, inter-individual variability phenomenon, science practice, scientist, experimental education

ABSTRACT

The purpose of this study is to examine the practice of scientists from the perspective of Ian Hacking’s ‘creation of phenomena’. Scientific phenomena, according to Hacking, are regular and do not exist in nature without the intervention of scientists or experimental tools. This study tries to derive scientific educational meaning by analyzing the thoughts and episodes of the ‘Sontanda (inter-individual variability)’ phenomenon experienced by four life scientists. The Sontanda phenomenon is a common term used by scientists to describe phenomena in which findings do not appear consistently even when studies are carried out using the same experimental procedure and materials. The following four educational implications were discovered as a result of the research. First, we confirmed the importance of embodied knowledge, or non-verbal knowledge, which solves issues by making appropriate judgments and reactions at all times, rather than simply becoming accustomed to the experimental method. This argues that propositional knowledge and non-verbal knowledge should be handled equally in order to provide students with a practical scientific inquiry. Second, we tried to reconsider the picture of the experiment. The phenomenon revealed in the interviews of scientists is rare, and it takes a long time to stabilize the phenomenon. On the other hand, the image of school experiments is always positive and consistent, necessitating a shift in perspective. Third, the precise meaning of scientific practice could be confirmed. This study confirms that scientists use their knowledge effectively in line with the circumstances, and we examined strategies to apply scientific practice to school instruction based on this. Finally, by provoking uncertainty, the Sontanda phenomena may give students with an opportunity to engage in meaningful scientific involvement. By breaking away from the cookbook experiment, this study expects school experimental education to help in efforts to experience scientific practice.

1. 서론

과학적 탐구는 과학을 과학답게 가르치는 것이며 실제 현대 과학이 작동하는 방식을 학습할 수 있는 활동이다(Schwab, 1982; Song, 2006). 과학적 탐구, 특히 과학탐구실험은 다른 교과와 구분되는 활동으로 과학교육자, 학생, 일반인들에게 과학 교과의 주요한 특성으로 인식되고 있다(Woolnough & Allsop, 1985). 학생들은 실험이나 활동을 통해 과학적 사고력과 문제 해결력을 증진시키고 과학적 개념을 구성할 수 있으며(National Research Council, 2000) 과학자들의 실제적인 탐구 수행을 경험해보고 이를 통해서 과학적 지식의 생산을 경험할 수 있다(Dunbar, 1995; Latour & Woolgar, 2013). 또한, 과학적 탐구는 과학자의 연구 과정을 학습하는 것뿐만 아니라 과학적 법칙 또는 이론의 생성, 그리고 과학의 본성(Nature of Science)을 이해하는데 도움을 준다(Latour & Woolgar, 2013; Lederman *et al.*, 2014; Matthews, 2012).

실험 교육은 19세기부터 시작되었다고 알려져 있으나(Gee &

Clackson, 1992) 활발하게 논의가 시작된 것은 1960년대부터다. 미국 과학진흥협회의(American Association for the Advancement of Science, AAAS)의 주도적인 역할로 시작된 SAPA (Science-A Process Approach)의 개발 보고서(Sanderson & Kratochvil, 1971)에 따르면, 교육과정의 목표를 ‘과학적인 사고방식을 적용하는 역량을 기르는 것’이라 명명하며 ‘기초 탐구 기능(basic inquiry skills)’과 ‘통합 탐구 기능(integrated inquiry skills)’으로 나누어 제시하였다. SAPA 교육과정에서 강조하는 과학탐구의 특징은 ‘위계적(hierarchical)’이며, ‘일반화 가능성(generalizability)’이 높으며, ‘발견(discovery)’을 통한 학습을 강조한다는 것이다(Oh, 2020).

이러한 SAPA의 관점은 탐구 중심의 과학교육에서 긍정적인 결과(Wideen, 1975)를 보이기도 하였으나, 과학자들이 ‘설록홈즈’와 같이 자연 속에 놓인 과학 지식을 발견하는 것처럼 묘사했다는 비판이 있었다(Wellington, 1981). 다시 말해 학생들이 단순히 실험을 통해 현상의 원인을 발견하는 것은 불가능하다는 점에서 많은 비판을 받았다(Finley, 1983). 또한, SAPA는 관찰을 가장 기본적인 과학적 기능으로

* 교신저자 : 전상학 (jeonsh@snu.ac.kr)
<http://dx.doi.org/10.14697/jkase.2022.42.2.253>

취급하여 다른 학문 영역으로 전이가 가능할 것이라고 보았는데, 이에 대해 많은 학자들은 ‘관찰은 연구자의 개념과 이론에 의존적이며 상황과 맥락에 따라 달라질 수 있음’을 지적하였다(Hodson, 1996; Millar, 2005; Wellington, 1981).

이러한 비판을 수용하여 2013년에 발표된 새로운 과학 교육 기준 (Next Generation Science Standard, NGSS)은 앞서 SAPA의 개발 보고서에서 주로 사용한 ‘기능(skill)’과 ‘과정(process)’을 대신하여 ‘실천(practice)’이라는 용어를 강조하고 있다(NGSS Lead States, 2013). 이러한 배경에는 과학탐구는 특이적인 기능뿐 아니라 지식 또한 중요하기 때문임을 표명하고 있는데(National Research Council, 2012), 앞서 언급한 이론 적재성에 대한 비판을 수용하여 지식의 중요성을 강조한 것으로 보인다. NGSS는 8가지 과학적 실천¹⁾(NGSS Lead States, 2013)을 제시하여 탐구의 의미를 설명하고 있으나, 실천의 의미가 무엇인지, 무엇을 해야 하는지, 그리고 무엇을 얻어야 하는지 그 의미를 알기 어렵다는 비판이 있다(Michael & Forman, 2006; Soler et al., 2014).

우리나라에서는 제2차 교육과정부터 탐구 중심의 과학교육을 중요한 요소로 보았으며(Song, 2006), 2015 개정 교육과정은 과학적 탐구를 위해서 기능과 지식을 통합하여 적용하는 능력이 중요하다고 밝히고 있다(The Ministry of Education, 2015). 또한, 2015 개정 과학과 교육과정에서 과학탐구실험 교과가 새롭게 도입됨으로써 과학적 사고력, 과학적 탐구 능력, 과학적 문제 해결력 등의 핵심 역량의 중요성이 강조되고 있다. 하지만, 최근 연구에 따르면 과학탐구실험 수업 준비 시 교과서의 활용 비율은 절반 이하로 나타났으며 많은 교사들이 수업 현장에서 어려움을 겪었다고 응답하였다(Byun et al., 2019). 과학탐구실험 수업 운영이 어려운 원인으로 ‘준비 시간 부족’, ‘수업 자료의 부족’ 등의 다양한 요소가 지목되었으나 이는 과학탐구실험이 도입되기 이전부터 탐구 수업 운영의 어려움으로 지목되었던 요소임을 알 수 있다. 즉, 미국의 NGSS와 마찬가지로 2015 개정 교육과정에서 제시한 과학적 탐구의 의미가 학교 교육에서 어떻게 적용될 것인가에 대한 의미가 모호하고 여러 개념들이 혼재되어 있어 학교 현장에서 과학적 실천을 어떻게 적용할 것인가에 대한 구체적인 연구가 필요한 실정이다(Crawford, 2014; Oh, 2020).

이에 과학철학자 이언 해킹(Ian Hacking)의 관점은 과학적 실천의 의미를 재고하고 학교 실험 교육이 나아가야 할 새로운 방향을 제시해준다. 해킹은 일반적인 실험의 이미지가 왜곡되어 있음을 지적한다. 해킹은 ‘현상의 드뭇’을 언급하면서 실험을 통해 만들어진 현상이 과학자의 길고 험난한 과정을 통해 만들어지는 것임을 주목한다. 따라서 해킹은 학교 실험의 목적이 이론의 정교화나 증명이 있지 않다고 주장한다. 해킹은 ‘실험이 어떻게 작동하고 있는지’, 그리고 ‘실험이 작동하고 있는 때가 언제인지’를 알려주는 것이 중요하다고 말한다

(Hacking, 1983). 즉, 실험의 목적은 실험을 통해 만들어지는 현상 그 자체를 가르치는데 있어야 한다는 것이다. 이러한 해킹의 관점은 이론을 학습하거나 예증하기 위한 실험을 벗어나 현상을 안정적으로 만들어내기 위한 세부적인 절차를 바라보게 함으로써 실험의 결과가 아닌 실험의 맥락과 그 과정에서 사용되는 지식의 중요성을 강조한다. 나아가 미국의 NGSS에서 과학적 실천이라는 용어를 사용하면서 강조한 기능과 지식이 어떻게 학교 교육에 적용될 수 있는가에 대한 함의를 제공해준다.

본 연구에서는 해킹의 관점을 기반으로 과학자의 실험을 분석하고자 하였다. 특히, 과학자가 실험 과정에서 경험하는 ‘손탄다’ 현상을 살펴봄으로써 과학적 실천의 구체적인 의미를 제공하고자 하였다. 손탄다라는 용어는 같은 재료와 방법을 사용했음에도 결과가 일정하게 나타나지 않을 때 사용하는 은어로서 과학자가 현상을 안정적으로 만들기 위한 과학자의 노력을 살펴볼 수 있는 좋은 기회를 제공한다. 또한, 손탄다 현상은 단순히 과학자가 실험을 통해 새로운 과학지식을 생성하는 과정뿐 아니라 이미 정립된 실험을 연구자가 습득하는 과정에서 어떤 노력을 기울이는지 살펴볼 수 있으므로 정제된 지식을 재생산하는 실험이 주를 이루는 학교 실험 교육에 적용했을 때 많은 시사점을 제공해준다. 따라서 본 연구에서는 과학자의 손탄다 현상에 대해 살펴보고 과학자의 손탄다 현상이 과학 교육에 주는 시사점을 탐색하고자 한다.

II. 이론적 배경

1. 현상 풀이

현상이란 그리스어(φαινόμενον, phainomenon)로부터 유래한 것으로 ‘볼 수 있는 어떤 것’ 또는 ‘사건 또는 과정’을 뜻한다(Bae, 2013). 이는 표준국어대사전에 제시된 현상(現象)- ‘인간이 지각할 수 있는 사물의 모양과 상태’ 또는 ‘본질이나 객체의 외연에 나타나는 상’-과 유사하다. 그리스부터 시작된 이러한 단어 ‘현상’의 쓰임은 흄(David Hume), 칸트(Immanuel Kant)를 거쳐 반 프라센(Bas C. van Fraassen)과 같은 구성적 경험주의에 이르기까지 본체와는 반대되는 개념으로 사용되어 왔다. 즉, 현상은 관찰자의 외부에 존재하는 객체를 우리의 의식과 감각기관을 통해 지각하는 것으로 그것의 대상과는 상관없이 변화하는 감각적인 것으로 간주되어 왔다. 자연스럽게 현상을 다루는 현상학(phenomenology)은 실재가 아닌 개인에게 드러나는 의식인 현상을 탐구하는 관점으로 나아갔다. 대표적으로 후설(Edmund Husserl)을 포함한 독일 철학자들은 개인이 실재를 어떻게 인식하고 있는지, 어떻게 느끼고 있는지를 연구함으로써 주관적 서술의 공통된 형식을 파악하고자 하였다. 따라서 현대의 현상학은 주관적이며 감각 자료와 밀접한 관계를 맺는다.

반면, 해킹은 이러한 철학자의 현상의 의미를 거부하고 현상은 공적이고(public), 규칙적이며(regular), 어쩌면 법칙적인(possibly law-like) 형태의 것이라고 주장한다(Hacking, 1983). 해킹에 따르면 과학자의 현상의 의미는 철학자의 현상의 의미와 구분된다. 해킹은 과학자가 현상의 의미를 ‘주목할 만한 것(noteworthy)’, 식별 가능한 것(discernable)’으로 사용함에 주목하였다. 즉, 현상은 일반적인 상황에서 규칙적으로 일어나는 독특한 사건 또는 과정으로 우리가 현상에서

- 1) 1. 질문하기(Asking question)
2. 모델 개발하고 사용하기(Developing and using models)
3. 탐구를 계획하고 수행하기(Planning and carrying out investigations)
4. 데이터 분석하고 해석하기(Analyzing and interpreting data)
5. 수학과 계산적 사고력 사용하기(Using mathematics and computational thinking)
6. 설명 구성하기(Constructing explanations)
7. 증거로부터 논증에 참여하기(Engaging in argument from evidence)
8. 정보를 수집하고, 평가하고, 의사소통하기(Obtaining, evaluating, and communicating information)

일어나는 규칙을 알게 되었을 때 법칙적 일반화(law-like generalization)할 수 있을만한 것으로 간주한다. 해킹은 물리학자들의 단어 '효과(effect)'의 뜻을 통해 자신의 논증을 이어간다. 일반적으로 물리학자들은 규칙적인 현상을 발견했을 때 그것을 '효과'라 부르는 경향이 있다(Hacking, 1983, 1984). 홀 효과(Hall effect), 광전 효과(photoelectric effect), 패러데이 효과(Faraday effect), 제만 효과(Zeeman effect) 등이 그것이다.

해킹은 홀 효과의 발견 과정을 언급하면서, 규칙적인 의미로서의 현상을 설명한다. 1879년, 존스 홉킨스 대학교 실험실에서 연구 학생으로 있던 홀(E. H. Hall)은 그의 지도교수 로우랜드(H. A. Rowland)로부터 맥스웰의 진술을 탐구해볼 것을 지시 받았다. 맥스웰은 『전기와 자기에 관한 논고(A treatise on electricity and magnetism)』(Maxwell, 1873)에서 전류가 흐르는 도체가 자기장 속에 놓이게 되면 자기장은 도체에 영향을 미치나 전류의 흐름에는 영향을 미치지 않는다고 말했다. 홀은 맥스웰의 진술로부터 도체가 자기장에 의해서 저항을 받거나 전기적 퍼텐셜을 형성할 것이라고 추측했다. 그리고 홀은 실험을 통해 도체의 저항을 구하는데 실패하였으나 자기장과 전류에 수직하는 퍼텐셜 차이를 얻는데 성공했다.

홀은 자신이 발견한 효과를 현상으로 기술하였는데, 1879년 11월 10일에 홀이 연구노트에 기록한 문장은 다음과 같다.

그럼에도 새로운 현상(phenomenon)이 발견되었다고 믿는 것은 모험에 가깝지만, 지금은 거의 보름이라는 긴 시간이 흘렀고 실험이 여러 차례 수행되었고 다양한 환경에서 성공적으로 반복되었다. (중략) 자석이 전류에 대한 효과(effect)를 가지고 있다고 선언하기에는 너무 이르지 않은 시점일 것이다(Hall, 1879, sheet 99²).

홀의 사례에서 드러나듯이 단어 '효과'와 '현상'은 앞서 해킹이 언급한 '주목할 만한 것' 또는 '식별 가능한 것'의 의미를 지니며 철학자의 현상과는 거리가 멀어 보인다. 이밖에 효과와 현상을 동일시하는 수많은 사례가 존재한다. 대표적으로 표준물리학 사전에서 '00효과'는 '~한 현상'으로 시작되며 '~한 현상이다'로 문장을 마치고 있다. 즉, 효과와 현상은 거의 동일한 의미로 사용되고 있으며, 현상이라는 단어는 철학자의 쓰임과는 달리 과학에서는 공적이고 규칙적인 것을 나타냄을 알 수 있다.

2. 현상의 창조

더 나아가서 해킹은 현상이 창조되는 것이라고 말한다. 그의 주장에 따르면 실험실 상황에서 일정한 장치와 도구 없이는 현상은 나타나지 않는다. 가령 앞에서 언급한 홀 효과는 전류가 흐르는 도체가

자기장 속에 수직하게 놓이면 전류와 자기장의 방향에 수직하게 전압이 걸린다. 하지만 순수한 자연 상태에서 그러한 배치는 존재하지 않으며 홀 효과는 일어나지 않는다. 즉, 현상은 과학자의 숙련된 솜씨와 정제되고 복잡한 장치들이 존재할 때만 나타나는 것이다.

"실험을 한다는 것은 현상을 만들고, 생산하고, 정제하고, 안정화하는 것이다. 세상에 현상이 무공무진하여 그저 여름에 블루베리가 수확되기만 기다리는 것처럼 널려 있다면, 실험이 잘 되지 않는 것에 사람들은 주목하게 되었을 것이다. 그러나 어떤 현상을 안정적으로 발생시키는 것은 좀처럼 쉽지 않은 일이다. 이것이 내가 현상을 단순히 발견하는 것이 아니라 창조하는 것이라고 이야기한 이유다. 그것은 길고 어려운 작업이다."(Hacking, 1983, p.230)

본 연구에서는 해킹의 현상이 의미하는 바, 즉 과학자는 실험을 통해 규칙적이고 안정된 현상을 창조해간다는 관점을 기반으로 과학자의 연구 경험을 살펴보고자 한다. 본 연구의 목적은 과학자가 실험을 처음 시작하면서 안정된 현상을 획득하기까지 경험하는 일반화된 과정을 도출하고자 하는 것은 아니다. 오히려 본 연구를 통해 같은 재료와 같은 연구 방법을 사용하여 실험을 수행하더라도 개인이 경험하는 현상은 서로 다를 것이며, 그에 따라 겪는 어려움도 다를 수 있음을 보여줌으로써 규칙적인 현상을 창조하고자 노력하는 과학자의 모습을 담고자 하였다. 본 연구는 실험에서 나타나는 현상을 새롭게 바라봄으로써 그동안 요리책식 실험(Tobin, 1984), 제한된 탐구 실험(Choi & Lee, 2016)이라고 비판 받아왔던 학교 실험을 새로운 시각으로 바라보고, 학생들을 과학적 실천으로 이끌어줄 수 있는 기회를 제공할 것이라 기대한다.

III. 연구 방법

1. 연구 참여자

연구 참여자는 생명과학을 전공한 과학자로서 대전 소재의 정부출연연구원 A에서 근무한 경험이 있거나 현재 근무 중인 연구원을 대상으로 진행하였다. 논문의 1저자는 A 연구원에서 3년 동안 연구원으로 근무하였으며, 연구 참여자와 같은 부서에서 근무하였거나 함께 연구를 진행한 경험이 있다. 연구자는 전공 특이적인 용어와 사고방식이 과학자의 실행을 분석함에 있어 저해하는 것을 막기 위해 의도적으로 연구자가 근무했던 부서(약 50인)에 연구 참여자 모집 공고를 게시하였고, 자발적으로 연구 참여 의사를 밝힌 4인을 선정하였다.

연구 참여자 중 두 명은 이학박사 소지자이며, 다른 두 명은 이학 석사학위를 소지하고 있었다. 연구 참여자 H는 선임연구원으로 연구

Table. 1 Research participant

| 연구 참여자 | 연구 경력 | 학력 및 연구분야 | 소속/지위 |
|--------|-------|------------|----------------|
| H | 15년 | 이학박사/종양생물학 | 정부출연연구원/선임연구원 |
| E | 9년 | 이학박사/종양생물학 | 정부출연연구원/박사후연구원 |
| C | 7년 | 이학석사/분자유전학 | 전)정부출연연구원/연구원 |
| Y | 5년 | 이학석사/신약개발 | 제약회사/연구원 |

2) Buchwald (1979) p.80에서 재인용.

경력이 15년 된 과학자로 현재 중앙생물학 실험실의 연구 책임자이다. 연구 참여자 E는 연구 참여자 H의 연구실 소속 연구원으로 박사 후 연구원(post-doctor)으로 근무하고 있으며 연구 경력은 약 9년이다. 연구 참여자 C는 석사후연구원으로 3년 동안 연구원에 분자유전학 실험실에서 근무하였으며 연구 경력은 총 7년이다. 연구 참여자 Y는 연구 참여자 H의 지도 아래 석사 학위를 수여 받았으며, 졸업 직후에 제약회사에 취업하여 신약개발팀에서 근무하고 있다. 연구 참여자 Y의 연구 경력은 총 5년이다.

2. 자료 수집 및 분석

연구자는 과학자의 실험을 통해 과학적 실천이 의미하는 바를 알아보기 위한 연구를 진행하던 중, 연구 참여자들이 공통적으로 연구 결과의 재현성에 대해 중요하게 생각하고 있다는 사실을 발견하였다. 연구 참여자들은 자신의 결과를 신뢰하기 위해서 동일한 실험을 여러 번 반복하는 것을 알 수 있었는데, 이 과정은 단순히 신뢰도를 높이기 위한 확인이 아닌 조작의 미숙이나 사람에 따른 결과 값의 차이가 누적되어 정반대의 결과로 해석될 수 있는 것을 방지하기 위해 실시하는 것임을 알 수 있었다. 연구자는 연구 참여자들과의 대화 가운데 이것을 ‘손탄다’라고 일반적으로 부르는 것을 알게 되었고, 손탄다 현상이 과학자의 실천을 잘 보여줄 수 있는 좋은 소재라고 판단하였다.

본 연구는 과학자 4인을 대상으로 2회의 심층면담을 진행하였다. 본 연구와 유사하게 과학자를 대상으로 과학지식의 생성과정을 연구한 Yang (2006)의 연구의 경우 과학자 4인을 대상으로 3회의 심층면담을 진행하였으나 본 연구의 연구자는 같은 연구원에서 근무한 경험이 있고 여러 편의 이학 논문 작업을 진행함에 따라 충분한 라포(rapport)가 형성한 상태였다. 또한, 연구자는 과학자가 사용하는 전문 용어 또는 실험방법에 친숙하여 2회의 심층 면담만으로 충분히 연구 참여자의 의도를 파악할 수 있다고 판단하였다. 모든 면담은 개별 면담으로 진행되었고 인터뷰는 약 2시간 동안 진행되었다. 1차 인터뷰에서는 반구조화된 면담지를 활용하여 손탄다 현상에 대한 정의와 경험에 대해 주로 물어보았다. 2차 인터뷰는 ‘숙련도’와 ‘보편성’이라는 두 개의 범주를 기준으로 ‘초보 과학자에게 손탄다 현상이 더 빈번하게 일어나는 이유는 무엇인지’, ‘실험에서 재현성이 갖는 의미가 무엇인지’, ‘손탄다 현상은 극복이 가능한 것인지’와 같은 질문들을

구성하여 과학자가 경험한 손탄다 현상의 의미를 명료하게 파악하고자 하였다. 1차와 2차 인터뷰의 시간적 간격은 약 두 달이었으며, 인터뷰를 진행하면서 손탄다 현상에 대한 과학자의 경험이 면담을 통해 충분히 수집되었다고 연구자가 판단할 때까지 유사한 질문을 계속 던지는 방식으로 진행되었다.

수집된 전사 자료는 총 세 단계로 나누어 분석하였다. 첫 번째 단계에서는 1차 인터뷰를 통해 수집된 자료를 Giorgi (1985)의 현상학적 연구방법을 활용하여 자료를 분석하였다. 현상학적 연구 방법은 인간이 경험한 체험을 있는 그대로 구성하며 이를 통해 체험의 본질을 기술하고자 하는 것을 그 목적으로 한다(Creswell, 2013). 현상학적 연구방법 중 Giorgi가 제안한 분석방법은 연구 참여자의 개인적 경험을 기반으로 현상의 본질을 파악하는 방법으로 개인의 독특성이 잘 드러나고 현상을 일반적 진술로 통합해낼 수 있다는 장점이 있다(Kang, 2021; Lee & Oh, 2016). Giorgi가 제안한 현상학적 연구 방법은 ‘전체적인 내용 파악하기’, ‘의미의 단위를 파악하기’, ‘학문적 용어로 변형하기’, ‘변형된 의미단위를 통합하기’라는 일련의 과정을 거친다. 구체적으로 연구자는 현상학적 태도를 가지고 전체적인 내용을 반복하여 읽음으로써 연구 참여자의 언어를 이해하고자 하였다. 이후에 Table. 2와 같이 의미단위로 분리하는 작업을 진행하였으며 이를 학문적 용어로 변형하였다. 마지막으로 학문적 용어로 변형시킨 의미단위가 지시하는 바를 통합하여 주제로 구성하였다.

Table. 2와 같이 추출된 의미단위들은 두 개의 주제로 통합되었는데 첫 번째는 ‘숙련도’와 관한 것이었다. 여기서 숙련도는 과학자가 한 실험을 반복적으로 수행함에 따라 각 실험에 대한 노하우를 축적하고 데이터를 일관되게 추출할 수 있는 능력과 관련된 것이었다. 두 번째는 ‘보편성’이었다. 손탄다 현상을 일으키는 원인들은 상이하였으나 실험을 처음 접하거나 익숙하지 못한 사람들에게 나타난다는 특성이 있었으며, 과학자가 전문가로 성장하는 과정에서 비슷한 고민과 과정을 겪는다는 특성이 있었다. 연구자는 두 주제를 바탕으로 Table. 3과 같은 반구조화된 면담지를 구성하였고 이를 바탕으로 2차 인터뷰를 진행하였다.

두 번째 단계에서는 이언 해킹의 ‘현상의 창조’라는 관점에서 과학자가 경험한 손탄다 현상을 분석하였다. 해킹의 관점에 따르면, 과학자의 실험을 통해 구현된 현상은 실험 도구와 실험자의 개입 없이 발생하지 않는다. 연구자는 이러한 해킹의 관점이 다양한 도구와 사

Table. 2 Examples of meaning unite extraction

| 면담 내용 | 의미 단위로 구분하기 | 학문적 용어로 변경하기 | 완성된 의미단위 |
|--|--|--------------------------------------|----------------------------------|
| 선배들이 제가 처음 입학했을 때 했던 말이 “네가 처음 이걸 하게 되면, 밴드가 제대로 디텍션(detection)이 되지 않거나 예쁘게 나오지 않을 수 있다. 손을 탄다”라고 그때 말했던 기억이 있는데, 실제로 해보니까 다행히 밴드는 나왔는데 좀 예쁘게 안 나왔던 기억이 있는데, 이제 선배님이 말한 대로 좀 버퍼, 버퍼도 좀 프레쉬한 거를 쓰고 또 젤(gel)을 내리거나 할 때도 좀 여러 가지 팁들이 있었던 걸로 기억하는데, 그렇게 하니 제가 익숙해져서 그런지 모르겠는데 나중에는 그래도 잘 나왔던 걸로 기억합니다. | 네가 처음 이걸 하게 되면, 밴드가 제대로 디텍션이 되지 않을 수 있다. | 초보자가 실험을 수행했을 때 실험의 결과가 나오지 않을 수 있다. | 특성1) 전문가가 되면 일관된 실험 결과를 얻을 수 있다. |
| | (처음하게 되면) 밴드가 예쁘게 나오지 않을 수도 있다. | 초보자의 데이터의 신뢰도가 떨어진다. | 특성2) 초보자는 흔히 겪는 일이다. |
| | (첫 시도)에 좀 예쁘게 안 나왔던 기억이 있다. | 첫 시도에 데이터의 신뢰도가 떨어졌다. | |
| | 선배님이 말한 대로 좀 버퍼, 버퍼도 좀 프레쉬한 거를 쓴다. | 시약을 새것으로 사용하는 등 최상의 실험재료를 사용한다. | 방법1) 실험재료를 점검한다. |
| 또 젤을 내리거나 할 때도 좀 여러 가지 팁들이 있었던 걸로 기억하는데, 그렇게 하니 제가 익숙해져서 그런지 모르겠는데 나중에는 그래도 잘 나왔던 걸로 기억합니다. | 또 젤을 내리거나 할 때도 좀 여러 가지 팁들이 있었던 걸로 기억한다. | 선배들의 조언에 따라 실험을 진행한다. | 방법2) 더 나은 실험 방법에 따라 실험을 진행한다. |
| | 제가 익숙해져서 그런지 모르겠는데, 나중에는 그래도 잘 나왔던 걸로 기억합니다. | 실험에 익숙해지고 데이터가 일관되고 신뢰도가 높게 나온다. | 특성1) 전문가가 되면 일관된 실험 결과를 얻을 수 있다. |

Table. 3 Examples of interview questions

| 드러난 주제 | 주요 면담 질문 내용 |
|--------|--|
| 숙련도 | · 초보자와 경력이 많은 연구자가 똑같은 실험을 진행한다면 어떤 차이가 날까요? · 연구 초심자가 좋은 결과를 한 번에 얻을 수 없는 이유는 무엇일까요? · 숙련된 사람이라고 말할 때, 숙련되었다는 것은 무엇을 의미하나요? |
| 보편성 | · 새로운 실험을 시작해서 원하는 결과를 얻기까지 어떤 과정을 겪게 되나요? · 손타는 현상은 극복 가능한 문제인가요? 어떻게 극복할 수 있나요? · 실험을 어떻게 가르치는 것이 좋을까요? |

Table. 4 Themes of meaning unite

| 대주제 | 소주제 |
|------------|---|
| 손타다 현상의 특성 | · 손타다 현상은 개선이 가능한 현상이다. · 손타다 현상은 과학자가 보편적으로 경험하는 현상이다. |
| 손타다 현상의 기능 | · 비언어적인 습씨가 체화된다. · 실험 방법에 표면적으로 드러나지 않은 실험의 원리를 이해한다. · 과학자는 성장을 경험한다. |

람의 개입으로 손타다 현상을 해결하고자 하는 과학자의 모습과 잘 부합한다고 판단하였다. 즉, 연구자는 과학자가 역동적인 개입을 통해 손타다 현상을 해소하고 안정적인 결과를 내는 것을 현상의 창조라고 보았다. 따라서 과학자가 안정적으로 현상을 창조하기 위해서 어떠한 요소들을 중요하게 생각하는지, 어떤 행위가 나타나는지를 중심으로 살펴보고 이를 일반적인 질적연구방법론에 따라 분석하였다. 분석방법은 앞선 1차 연구의 연구방법과 유사하게 연구 참여자의 발화를 의미단위로 구분하여 주제들을 추출하였다. 이때 분석과정에서 드러난 주제들은 ‘손타다 현상의 특성’과 ‘손타다 현상의 기능’으로 분류할 수 있었으며 이는 다시 몇 개의 소주제로 분류되었다 (Table 4). 이후에 추출된 소주제별로 에피소드를 다시 추출하는 작업을 진행하였으며 이를 바탕으로 논문을 작성하였다.

세 번째 단계에서는 연구 결과의 신뢰도와 타당도를 확보하기 위해서 과학교육 전문가 3인과 과학교육 박사과정 2인으로 구성된 소그룹 내에서 세미나를 열고 분석 결과를 여러 차례 공유하고, 연구 결과를 검토하여 분석의 타당도와 신뢰도를 확보하였다. 이후 분석한 결과물을 연구 참여자 4인에게 보여주고 참여자 검토(member checking)를 받아 연구 결과를 최종적으로 정리하였다.

IV. 연구 결과

1. ‘손타다’ 현상의 정의 및 특성

과학자들 사이에는 소위 ‘손타다’라는 은어가 있다. 동일한 실험 방법과 재료를 가지고 실험을 수행함에도 연구자마다 결과가 다르거나 같은 연구자가 수행하더라도 결과가 일정하게 나타나지 않는 현상을 일컫는다. 즉, 손타다 현상은 주로 현상의 재현에 관한 문제로 특정 실험에 대한 경험이 일정한 정도에 이르기까지 나타나는 것이 특징이다. 본 연구자는 과학자의 손타다 현상이 해킹이 말하는 현상의 창조를 잘 설명해주는 좋은 사례라고 판단하였다. 본 절에서는 과학자의 손타다 경험을 통해서 실험에서 현상을 창조한다는 것이 의미하는 바가 무엇인지 탐구하고자 한다.

가. 손타다 현상의 정의

연구자는 연구 참여자들에게 손타다 현상의 정의를 내리는 동시에 본인의 구체적인 경험을 말해주길 요청하였다. 연구 참여자들은 손타다 현상을 주로 실험에 재현성과 관련지어 인식하고 있었다(면담 #1). 연구 참여자 C는 재현율을 언급하며 “일관되게 나오기 힘든 실험들을 가지고 손타는 실험”이라고 정의하였다. 이와 유사하게 연구 참여자 Y는 “분명히 같은 메서드(methods)와 프로토콜(protocol)을 똑같이 줘도 그거를 재현 못하는 사람이 있잖아요. 하는 사람도 있고 그럴 때 쓰는 말인 것 같아요”라고 언급하면서 동일한 재료와 방법을 사용함에도 실험 결과가 재현되지 않는 경우를 손타다라고 인식하는 것으로 나타났다.

- C : 일단 손 타다는 말 자체는 이제 특정 실험을 할 때 사람마다 좀 결과가 그러니까 재현율에 관련된 내용인 것 같은데, 예를 들어서 아까 말씀드렸던 다섯 번 실험을 한다 했을 때 이게 유의미한 쪽이든 유의미하지 않은 쪽이든 어쨌든 다섯 번 다 일관되게 나오는가가 중요하다고 생각하는데, 그렇게 최대한 여러 번 실험을 했을 때 일관되게 잘 나오는 사람보고 그렇게... 그렇게 일관되게 나오기 힘든 실험들을 가지고 손 타는 실험이라고 하는 것 같은데.
- Y : 언제 쓰는 말이라고 해야 되죠? 그냥 어떤 실험을 했을 때 확실히 어떤 사람이 하면 그 결과가 잘 나와요. 그러니까 근데 그거를 다른 사람이 또 똑같이 하려고, 분명히 같은 메서드(methods)인데, 프로토콜(protocol)을 똑같은걸 줘도 그걸 재현을 못하는 사람이 있잖아요. 하는 사람이 있고, 그럴 때 쓰는 말인 것 같아요.
- H : 우선은 실험적인 어떤 원칙을 지키지 않았을 때 손타다라는게 좀 맞을 것 같아요. 무슨 말이나면 예를 들어서, 나는 잘 되는데 상대방은 안 돼. 혹은 상대방은 너무 잘되는데 나는 그 실험이 재현이 안 돼. 이게 손타다라는 의미로 해석을 해도 되잖아요.
- E : 손 타다. 내가 실험했을 때 나왔는데, 다른 친구가 했을 때 실험 결과가 안 나왔습니다. 그게 손타다라고 생각을 하는데.

면담 #1

나. 손탄다 현상의 특성

연구자는 과학자들의 손탄다 현상에 대한 경험을 듣는 과정에서 손탄다 현상의 두 가지 특징을 발견하였다. 첫 번째로 손탄다 현상은 과학자들이 실험을 수행하는 과정에서 흔히 겪는 보편적인 경험이라는 것이다. 연구 참여자 C는 자신의 대학원 석사 시절의 경험을 손탄다 현상의 구체적인 예로 들어주었다(면담 #2). 연구 참여자 C는 대학원 석사과정 시절에 단백질을 검출하고, 정량하는 웨스턴 블랏(Western blot)³⁾이라는 실험을 처음 배우게 되었는데, 연구실 선배로부터 ‘검출하고자 하는 단백질의 사이즈가 일반적인 단백질 사이즈보다 커서 검출이 되지 않거나 결과가 예쁘게 나오지 않는 손타는 현상을 겪을 수도 있다’는 조언을 받았다고 회상했다. 연구 참여자 C는 선배들의 예상대로 첫 실험에서는 원하는 단백질을 깔끔하게 검출하는데 실패하였으나, 선배들의 조언을 통해 나중에는 원하는 결과를 얻었다고 언급하였다. 연구 참여자 C의 경험으로 미루어 볼 때, 연구 참여자 C의 선배들은 연구 참여자 C와 동일하게 손탄다 현상을 경험한 것으로 짐작할 수 있다. 즉, 손탄다 현상은 개인이 경험하는 특수한 사례가 아닌, 실험을 진행하는 과정에서 일어나는 보편적인 현상이라고 추측할 수 있다.

연구자 : 본인이 직접 경험해 본 적이 있어요?

C : 예를 들어서 이건 또 석사 때 얘기를 하게 됐는데 그때 처음에 조금 느꼈던 건데, 그때 웨스턴 블랏(Western blot) 실험을 하고 있었는데 제가 보던 사이즈가 완전 280kDa에서 300kDa 가까이 되는 단백질 사이즈여서, 사이즈가 커서 선배들이 제가 처음 입학했을 때 했던 말이 **“내가 처음 이걸 하게 되면, 밴드가 제대로 디텍션(detection)이 되지 않거나 예쁘게 나오지 않을 수 있다. 손을 탄다”**라고 그때 말했던 기억이 있는데, **실제로 해보니까 다행히 밴드는 나왔는데 좀 예쁘게 안 나왔던 기억이 있는데, 이제 선배님이 말한 대로 좀 버퍼, 버퍼도 좀 프레쉬(fresh)한 거를 쓰고 또 겔(gel)을 내리거나 할 때도 좀 여러 가지 팁들이 있었던 걸로 기억하는데, 그렇게 하나씩 제가 익숙해져서 그런지 모르겠는데 나중에는 그래도 잘 나왔던 걸로 기억합니다.**

면담 #2

이러한 사실은 연구 참여자 H의 면담에서도 잘 드러난다. 연구자는 연구 참여자의 지도 학생이 손탄다 현상을 경험할 때 어떤 조언을 해주는지 물어보았다. 연구 참여자 H는 “실질적으로 경험에서 나오는 조언들을 많이 해줘요. (중략) 저도 그런 경험들을 겪어왔고, 연구원들이 겪는 어려움은 제가 예전에 겪었던 경험이란 좀 많이 비슷해요(면담 #3)”라고 대답하였다. 이처럼 연구 참여자 H의 답변에서도 손탄다 현상은 실험을 처음 시작하는 이들에게 비슷하게 나타나는 보편적인 특징을 가진다는 것을 알 수 있었다. 즉, 손탄다 현상은 개인의 특수한 경험이 아닌 과학자가 실험을 통해 안정된 현상을 창조하기까지 겪는 보편적인 어려움을 의미한다.

3) 웨스턴 블랏(Western blot)은 단백질의 전기적 성질을 이용하여 단백질을 크기별로 분리하고 항체를 통해 검출하는 실험이다. 연구 참여자 H의 박사후연구원시절 지도교수는 “웨스턴 블랏은 아트(Art)”라고 말했을 만큼 깔끔한 데이터를 얻기 힘든 실험으로 알려져 있다.

연구자 : 그러면 학생들이 그런 (손탄다) 현상을 겪을 때 어떤 조언을 보통 해주세요?

H : **실질적으로 경험에서 나오는 조언들을 좀 많이 해줘요. 왜냐하면 비슷한 실험을 많이 하고 있기 때문에 저도 그런 경험들을 겪어왔고, 그러면은 이제 학생들이나 연구원들이 겪는 어려움은 제가 예전에 겪었던 경험이란 좀 많이 비슷해요.** (중략) 그래서 원리 원칙대로 가면 사실 손 타는 것은 아주 까다로운 실험이 아니면 그래도 어느 정도 해결은 잘될 것이라는 거죠.

면담 #3

두 번째로, 손탄다 현상은 노력에 의해 개선이 가능한 현상이라는 것이다. 앞서 면담 #2에서 연구자 C와 그의 연구실 선배들은 손탄다 현상을 경험하였고, 실험 재료를 재정비하거나 실험에 익숙해지는 과정을 통해서 더 이상 손탄다 현상이 나타나지 않는 것을 경험하였다. 또한 면담 #3에서 연구 참여자 H는 “원리 원칙대로 가면 사실 손타는거는 아주 까다로운 실험이 아니면 그래도 어느 정도 해결은 잘 될거다”라고 언급하며 손탄다 현상은 노력에 의해서 개선이 가능한 부분이라고 언급하였다. 이러한 사실은 연구 참여자 Y의 경험에서 더욱 두드러지게 나타났다.

연구 참여자 Y는 최근 회사에서 부서 이동을 겪었다. 새로운 팀은 단백질의 활성화 형태(activated form)를 탐색(screening)하는 카이네이즈 어세이(Kinase assay)⁴⁾ 실험을 주로 담당하는 부서였다. 연구 참여자 Y는 부서 이동전에는 카이네이즈 어세이 실험을 한 번도 해본 적이 없었다. 연구 참여자 Y는 처음 이 실험을 시작하였을 때 손탄다 현상을 겪었고, 오랜 시간 연습을 통해서 지금은 가장 잘하는 실험이 되었다(면담 #4). 이처럼 과학자들은 손탄다 현상을 노력을 통해서 극복하고 있고, 개선이 가능한 것으로 인식하고 있는 것으로 드러났다.

연구자 : 그럼 본인이 이제 ‘내가 이 실험을 굉장히 잘한다’ 이런 게 있어요? 손 타지 않고 잘한다.

Y : 저는 지금 새로운 팀 옮기고 나서 배웠던 거. 카이네이즈 어세이(Kinase assay)를 그래도 자신 있게 하는 것 같아요.

연구자 : 아예 어떤 연습을 많이 해서 그런가? 아니면 처음부터 잘했어요?

Y : **연습을 엄청 많이 했죠. 처음엔 아예 이게 384well에서 하는 거라서 엄청 힘들더라고요. 전동 파이펫을 처음 써보기도 했고, 익숙해지는 데까지 한 4개월 정도 걸린 것 같거든요. 근데 진짜 연습 많이 했거든요. 저는 거의 하루에 두세 시간은 붙잡고 있었던 것 같아요. 그것만. 그래서 지금은 완전 익숙하고 잘하기도 하고.**

면담 #4

2. ‘손탄다’ 현상의 기능

면담 #1에서 드러나듯이, 손탄다 현상은 실험의 재현성과 밀접한 관련이 있다. 특히, 과학자는 실험을 통해 현상을 안정적으로 만들어

4) 카이네이즈 어세이(kinase assay)는 단백질의 활성화 형태(phosphorylation form)를 측정하는 실험으로 연구 참여자 Y는 384개의 웰(well)이 있는 플레이트(plate)에 서로 다른 약물을 1µl를 각각 넣어 약물의 효과를 알아보는 실험을 진행하였다. 과학자들은 일반적으로 실험이 잘 되었는지 확인하기 위해서 플레이트 양 끝단에 대조군 약물을 넣게 되는데, 연구 참여자 Y는 대조군의 값이 매번 서로 달라 실험 결과를 신뢰할 수 없는 손탄다 현상을 겪었다.

내고 일관된 결과를 도출하는 것이 주된 역할이라는 점을 미루어 볼 때, 연구자는 과학자가 실험에서 일관되지 못한 결과를 만들어내는 것을 손탄다 현상이라고 보았다. 따라서 연구자는 추가적인 인터뷰를 통해 과학자들에게 실험이 재현되지 않았던 구체적인 사례를 물어봄으로써 손탄다 현상이 과학자에게 어떠한 경험을 제공하는지 알아보 고자 하였다. 특히, 손탄다 현상은 주로 실험을 처음 접하는 초심자 에 많이 나타난다는 점에 주목하여 초심자와 경력자를 대비하여 질문 하였다. 과학자의 인터뷰를 통해서 드러난 손탄다 현상의 원인은 실험의 종류마다 상이하였다. 하지만 과학자들은 손탄다 현상을 통해서 흔히 '감'이라고 표현되는 노하우(know-how)를 축적하고 성장을 경험하는 것으로 드러났다.

가. 반복을 통한 솜씨의 체화

과학자가 손탄다 현상을 경험하고 이를 해소하는 과정에서 겪은 손탄다 현상의 첫 번째 기능은 솜씨를 축적하는 체화의 기회를 제공 한다는 것이다. 이때 솜씨의 의미는 실험 절차에 익숙해지는 데에서 나아가 반복된 실험을 통해서 체화될 수 있는 암묵적 지식을 말한다. 구체적으로 연구 참여자 Y는 실험 절차상에 익숙하지 못한 요소를 손탄다 현상의 원인으로 꼽으며(면담 #5) 면담 #4의 실험과 관련된 추가적인 에피소드를 들려주었다. 연구 참여자 Y는 실험을 처음 접했 을 때는 원하는 값이 나오지 못해서 어려움을 경험했으나 반복된 실험을 통해 손탄다는 현상이 줄었다고 회상하였다. 또한, 자신의 후임으 로 온 연구원이 자신과 같은 현상을 경험하는 것을 보고 “반복해서 하는게 제일 중요한거구나. 그래서 손을 탄다는 거구나”라고 회상하 면서 실험에서 실험 절차가 체화되는 것의 중요성을 강조하였다.

연구자 : 손탄다라는 현상은 왜 일어나는 거예요?

Y : **그것도 결국 익숙함의 차이가 아닐까 싶어요. 아기는 익숙함, 익숙 함이죠.** 이게 또 결국에는 카이네이즈 어세이(kinase assay) 로 돌아가서 좀 그렇긴 한데, …(중략)… 제가 이제 (새로운) 팀으로 발령을 받아서 배워야하는데 아무래도 저는 (일정한 결과 값이) 안 나오는 거죠. ‘값이 왜 안 나올까 했는데, 당연히 안 나올 수밖에 없던 거죠. 왜냐하면 (시약이) 다 다르게 들어 갔으니까. 웰(well)마다. 근데 **그래서 몇 번을 반복하다 보니 까 이제 저도 나오기 시작하는 거예요. 그래서 그렇게 ‘이제 얼마만큼 많이 해보느냐가 진짜 중요한 거구나 해서, 이제 어느 순간 제가 그게 너무 익숙해지고 제가 잘하니까 저 혼자 그 어세이를 담당하게 됐어요.** 그래서 저만 하다가 이제 제가 또 다른 팀으로 발령받게 된 거죠. 그러면서 그 실험을 그러 면 누가 해야 되냐. …(중략)… 그거를 할 수 있는 사람이 이제 없는 거예요.

연구자 : 그렇죠.

Y : 근데 어찌 됐건 일은 해야 되니 굴러가야 되니까. **거기에 어떤 분이 또 했는데 거기도 이제 처음 하나까 당연히 값이 안 나오죠.** …(중략)… 처음에는 제가 (부서에서) 나오고 나 서 그분이 (혼자) 할 때 “이게 뭔가 효소가 이상한 것 같다”라 고 하는 거예요. 그래서 “아닐 거다 효소는 이상해질 리가 없다” 이렇게 해서 여러 번 계속 해보자 이렇게 했더니 (실험이) 된 거죠. **그래서 느낀 거죠. ‘또 진짜 손을 타는구나 그 익숙함 때문에 그런 거구나 싶더라고요. 제가 뭘 다른걸 한게 아니고**

Y : **그분들도 그전에 계시던 분들도 다른걸 한게 아니잖아요. 방법을 뿌린 것도 아니고 일부러 조작한 것도 아니고…**

면담 #5

연구자는 연구 참여자 Y가 언급한 ‘익숙함’이 단순히 실험 절차에 능숙해지는 과정을 언급하는 것인지 실험과 관련된 암묵적 지식을 내포하는 것인지 알아보기 위해 초보 과학자와 경력자를 비교하여 물어보았다. 이에 대해 Y는 ‘이정도 스템은 대충 이렇게 해도 되겠다 (면담 #6)’하는 노하우가 형성되는 것으로써 실험과정 중에 어떤 과정 에 더 집중적으로 신경을 써야하는지 아는 암묵적 지식이 초보 과학자와 경력자 사이의 가장 큰 차이점이라고 답하였다.

연구자 : 그러면 초보, 처음 실험을 하는 사람하고 경력이 많은 사람이 똑같은 실험을 진행한다고 하면 어떤 차이가 나타날까요?

Y : **일단 처음 실험하는 사람은 스템 하나하나를 어떻게 변형해야 될지도 모르고, 그러니까 뭐가 중요한지를 일단 모를 거 아니 예요. 어떤 실험을 하면서 ‘어떻게 진짜 중요한 걸까’ 이런게 감이 또 안올테고.** 세팅을 어떻게 해야할지, 컨트롤을 뭘 해야 되고… 예를 들면 그런 거예요. 그런 기초적인 것도 아무것도 모를 텐데, **이제 오래된 사람은 그냥 딱 보면 ‘이정도 실험은 어떻게 하면 되겠다’하는게 그냥 그려지는 거죠.** 거기서부터 차이 나는 것 같아요. 그러니까 어떤 실험을 함에 있어서 두려 움이 없는 거죠. 이게 밥 먹듯이 했던거니깐. **‘이정도 스템은 대충 이런 거는 그냥 해도 되겠다’ 이런 감도 있을 거고 어떤 포인트에서 가장 중요하나 집중적으로 해야 되는지 그런 것도 잘 알 테고 그런 차이일 것 같은데요.** 그리고 트러블슈팅이 잘된다는 거. 처음 해본 사람은 어떤 게 어떤 스템에 의해서 이런 결과가 나왔고 그걸 어떻게 변형을 해야 다시 좋은 결과가 나오는지 모를텐데, 많이 해본 사람은 딱 보면 ‘이제 이걸 수정 해봐라’ 이렇게 조언을 해줄 수 있는 거죠.

면담 #6

나. 트러블슈팅(troubleshooting)을 통한 실험의 원리 이해

두 번째로 과학자가 경험한 손탄다 현상의 기능은 값이 있는 ‘실험 의 원리’를 이해하게 도와준다는 것이다. 연구 참여자 E는 손탄다 현상이 실험에 사용되는 재료와 기구의 이해가 부족할 때 나타난다고 언급하면서, 이를 ‘물질 바라보기’라고 표현하였다(면담 #7). 연구 참 여자 E는 DNA를 추출할 때 사용되는 화학물질 Sodium Dodecyl Sulfate (SDS)가 온도에 민감하여 결과에 영향을 미칠 수 있음을 설명 하면서 실험 환경에 맞게 재료의 특성과 원리를 파악할 때 손탄다 현상을 해결할 수 있다고 대답하였다. 연구 참여자 E 이외에도 모든 연구 참여자가 손탄다 현상을 해결하기 위해서는 실험의 원리를 이해 하는 것이 중요하다고 강조하였다.

연구자 : 손탄다 현상이 왜 발생한다고 생각하세요?

E : 말씀드렸던 것처럼, 맨 처음에 이제 실험을 시작할 때 ‘내가 이걸 왜 하는지’, ‘결과가 어떤 식으로 나와야 되는 건지’ 예상 을 하고, 그 다음에 **들어가는 재료들의 이런 특성들에 대해서 생각을 하고 실험을 해야 되는데, 그 특성들에 대해서 생각을**

E : **안하다 보니까 뭐 정확하게 따라할 수 없는 거 같아요.** 그리고 환경이 정확하게 조성이 되는 것도 아니고. 그럴 때 이 특성에 따라서 이 특성은, 이 온도에서는, 예를 들어 SDS는 온도가 낮아지면 석출되는데 SDS를 이용해서 DNA를 추출할 때 SDS가 석출된 상황에서 내가 넣으면 SDS의 양이 적게 들어가니까, 당연히 DNA양이 적게 추출될 수밖에 없고 그러한 것들이 중요한 요인인 것 같습니다. 그럼 SDS가 추운 거울에 어떻게 해야 되느냐. 조금 녹이고 해야 되겠죠. 이런 식으로 **내가 이 특성 'SDS는 추우면 석출되는구나' 이런 물질의 특성을 알고 해야 되는데, 그걸 모르고서 그냥 하는대로만 하니깐. 이제 그런 것들이 생기는 것 같아요.**

연구자 : 그러면 그런 손탄다라는 현상을 줄이려면 어떻게 할 수 있을까요?

E : **손탄다라는 현상을 줄이려면 스스로가 그런 내가 실험을 하는 거예요. 모든 것들을 그 특성을 다 파악을 해야 될 것 같아요.** 파악을 맨날 맨날 하지는 못하더라도 초반에 배울 때는 파악을 하고, 이런 주의사항들에 대해서는 계속해서 생각을 하면서 실험을 해야 될 것 같습니다.

연구자 : 그럼 그렇게 하는 것이 프로토콜을 수정하는 쪽이에요? 아니면 어떤 경험치적으로 쌓이는 느낌이에요?

E : 프로토콜. 수정은 아니고 그냥 그 프로토콜 자체인데, 이 물질을 내가 실험 재료에 이용하는 게 아니라 실험 재료에 이용하지만, **이 물질을 그냥 바라봐주는 거죠. '넌 이렇구나' 이거를 하는 거니깐, 경험치 쪽이 더 맞다고 봐야겠죠.**

면담 #7

이러한 ‘트러블슈팅을 통한 실험의 원리 이해’는 단순히 실험 절차를 습득하거나 실험의 기초적인 원리를 이해하는 것이 아니라 명시적으로 드러나지 않은 원리들을 하나하나 깨우침으로써 또 다른 맥락에서 문제점이 출현했을 때 해결할 수 있는 능력을 일컫는 것임을 면담 #8을 통해 알 수 있었다. 즉, 원리를 이해하는 것은 단순히 실험 과정을 이해함으로써 지식의 영역이 확장되는 것을 의미하지 않고, 새로운 환경에서 실험이 재현되지 않거나 실험 자체가 실패했을 때 대처하는 능력과 밀접한 관련이 있는 것을 알 수 있었다. 이는 Y이외에 다른 연구 참여자 E와 H의 면담에서도 잘 나타났다. 연구 참여자들은 모두 문제 해결과정(troubleshooting)을 언급하면서 원리를 함께 언급하였으며 원리를 이해하는 것이 실험이 재현되지 않는 상황을 해결해주는 요소라고 직접적으로 대답하였다.

연구자 : 그럼 실험 노하우는 뭐예요?

Y : **그 노하우 딱히 뭐라고 할 건 없는데, 그냥 원리를 잘 알고 하는 실험, 모든 실험을 할 때 그냥 프로토콜만 외운다는 게 아니라 이 스텝 하나하나가 왜 필요한지 그는 그 안에 들어가는 시약들이 무슨 역할을 하는지, 그냥 솔직히 요즘은 키트(kit)가 잘 나와 있어서 키트 안에 다 모든 버퍼들이 그냥 들어가 있잖아요. 그니깐 나중에는 이게 무슨 역할을 해서 이렇게 버퍼를 넣는지도 모르고 그냥 넣는 거예요. 그래서 트러블 슈팅이 안 되는 것 같더라고요. 근데 만약에 좀 시간이 오래 걸릴 수는 있겠지만 모든 시약의 원리와 이게 왜 들어가는지 어세이(assay) 원리 이런 것부터 다 공부하고 이 실험을 들어가게 되면, 내가 어떤 실험을 하다 막혔을 때 그 문제**

Y : 점을 파악하는데 엄청난 도움이 되지 않을까. **저는 항상 그렇게 느끼거든요. "모든 원리를 파악해라!"**

면담 #8

다. 손탄다 현상을 통한 성장의 경험

손탄다 현상의 세 번째 기능은 손탄다 현상을 통해 노하우를 축적하고 성장을 경험하는 좋은 기회를 제공한다는 것이다. 연구 참여자 H는 자신의 ‘손탄다’ 경험을 통해 배우고 성장하는 기회를 얻었다고 답했다. 연구 참여자 H는 자신이 중합효소 연쇄반응(PCR)을 진행하는 과정에서 증류수(DW)가 오염되는 현상을 경험하였는데, 이를 해결하는 과정을 통해서 실험에 사용되는 물질의 특성을 이해하고 노하우를 축적하는 계기가 되었다고 말하였다(면담 #9).

연구자 : 박사님은 그러면 손 타는 경험하셨던 거는 무엇이 있나요?

H : 뭐 기본적으로 셀 컨탐(Cell contamination, 세포 오염)도 해봤고 그리고 PCR⁵⁾에 DW(증류수) 오염도 해봤고 다 해봤죠.

연구자 : 가장 어려웠던 것. 아니면 극복하는 데 시간이 오래 걸렸던 것은요?

H : PCR 컨탐이 가장 어려웠어요. DW에서는 아무것도 증폭이 되면 안 되는데. 증폭이 되니까. (중략) **사실 저는 되게 많이 배웠거든요. 역으로 생각하면 내가 뭔가 컨탐을 시켰는데 이 오염의 원인이 뭐고 그러니까 다시 돌아가야 되는 거죠. (중략) 그런 부분들을 토대로 트러블슈팅(trouble shooting)이 되잖아요. 그러면은 이제 나중에는 되게 긍정적인 요소로 다가오죠. 애네들이 그거는 그러면 어떻게 하면은 '이게 좀 잘 돼, 손을 좀 덜 타' 이런 게 사실 노하우라고 생각을 해요.**

면담 #9

유사하게 연구 참여자 Y 또한 앞서 면담 #4의 경험을 통해서 노하우를 터득했으며 이 경험을 통해 성장한 것을 느꼈다고 언급하였다(면담 #10).

연구자 : 이렇게 또 손 타는 걸 겪었을 때 성장이 되는 건가요?

Y : **그렇죠. 제가 그만큼 어느 순간 그 경지에 도달했을 때 결과가 나오잖아요. 그러면 '내가 성장했구나'를 확 느끼는 거죠.**

면담 #10

이상으로 손탄다 현상이 과학자에 주는 세 가지 기능에 대해 알아 보았다. ‘손탄다’라는 은어 자체는 같은 재료와 방법을 사용함에도 일관된 결과가 나오지 않는 것으로 부정적인 용어임에 틀림없다. 그러나 연구에 참여한 모든 과학자는 손탄다 현상을 반복된 실험을 통해 개선이 가능한 현상으로 인식하고 있었으며 전문가로서 노하우를 축적하고 성장할 수 있는 좋은 경험을 제공해주는 것으로 인식하고 있었다. 구체적으로 과학자는 손탄다 현상을 해결하기 위해 트러블슈

5) Polymerase Chain Reaction (PCR): DNA 증폭 기술로 소량의 DNA를 증폭시켜준다. 면담 #9의 경우, 증류수는 순수한 물이기 때문에 증폭시킬 DNA가 없어 증폭되면 안 된다. 만일 증폭될 경우 증폭시킴으로써 했던 DNA의 합성을 방해하여 결과가 거짓 양성(false positive)이 나올 수 있다.

탕이라고 부르는 실험의 변주 과정을 반복해서 수행하게 되고 이 과정에서 비언어적인 솜씨가 체화되며, 물질과 도구를 이해하는 등 과학자로서 전문성을 획득하는 것을 알 수 있었다.

3. '손탄다' 현상이 과학교육에 주는 함의

이상으로 해킹의 관점을 바탕으로 과학자가 현상을 안정적으로 창조하는 과정, 즉 '손탄다' 현상을 살펴보고자 하였다. 과학자가 현상을 안정적으로 창조하기 위해서 동일한 실험을 반복하고, 그 과정에서 변주를 일으키는 것은 '새로운 지식의 창출'이라는 목적 하에서는 너무 자명한 것으로 보인다. 그렇다면, 과학적 사실의 생성이 아닌 과학의 개념을 이해하고 탐구능력을 함양하여 과학적 소양인을 양성하는 것을 목표로 하는 과학교육에서는 어떠한 시사점을 제공하는가? 이에 연구자는 다음과 같은 네 가지 교육적 의의를 제안하고자 한다.

첫째, 비언어적인 행위는 실험에서 명제적인 지식만큼이나 중요한 요소이다. 그동안 과학철학을 비롯한 과학교육에서는 과학을 명제들의 집합으로 보고 그 명제들의 체계적인 집합인 이론에 주로 관심을 가져왔다(Chang, 2012; Lee, 2004). 이러한 경향은 비교적 최근까지도 실험이 이론을 검증하기 위한 수단으로써 사용할 때만 가치롭다는 지위를 부여했으며, 실험에서 요구되는 비언어적인 체화과정을 행동주의적 관점과 연결하여 상대적으로 경시하였다(Lee, 2021).

본 연구에 따르면, 과학자가 현상을 창조하기 위해서 실험에 익숙해지는 것은 단순히 절차상에 유의하여 미연에 일어날 수 있는 실수를 방지하는 것뿐 아니라 '감'이라고 표현되는 암묵적 지식을 쌓아가는 과정으로 드러났다(면담 #5, #6). 이는 학교 교육에서도 다르지 않은데, Lee *et al.* (2015)가 연구한 학교 현장에서 프로젝트 기반의 과학 활동에서도 학생들이 체화된 솜씨를 바탕으로 탐구를 발달시켜가는 과정을 통해 솜씨의 중요성을 보여준 바 있으며 Lee (2021)의 연구에서도 과학 교과에서 훈련의 가치에 중요성에 대해 기술한 바 있다. 그럼에도 과학교육에서 언어로 표현되는 인지적 측면이 강조되는 것에 비해 비언어적인 솜씨가 갖는 중요성과 의미를 적용시키려는 시도는 여전히 부족한 실정이다. Lynch (2017)에 따르면 탐구 활동은 매 순간 새롭게 발생하는 사건과 그에 대한 즉각적인 반응이므로 학생들에게 체화된 암묵적 지식을 활용하여 문제를 해결해줄 필요성이 요구되는 바이다. 본 연구는 이론의 중요성을 부정하거나 의미를 격하시키고자 하는 것은 아니다. 또한, 비언어적인 행위가 과학적 활동에서 가장 중요하다고 주장하는 것도 아니다. 다만, 과학적 실천을 추구하는 과학교육에서 언어로 표현되는 명제적인 측면뿐 아니라 비언어적인 지식에 관심을 가지고 가르칠 때, 과학적 행위에서 실제로 일어나는 일들을 이해하고 진정한 과학적 실천이 이루어질 수 있음을 제안하는 바이다.

둘째, 과학자가 현상을 어렵게 창조하는 과정을 조명함으로써 현상의 이미지를 재고하고자 한다. Kirschner (1992)는 표준화된 과학교육 실험을 '지침서만 따라하면 바보라도 할 수 있는 실험'이라고 강하게 비판한 바 있다. 다수를 위한 교육, 지식의 전달이라는 목적 하에 학교 실험이 요리책식 실험이 되는 것은 필연적이겠으나 표준화로 인해 놓치고 있는 것이 무엇인지 숙고해볼 필요가 있다. 전통적으로 실험 교육은 자연 현상을 학생들로 하여금 체험하고 현상에 대한 실제적인 경험의 획득을 목표로 하고 있다(Millar *et al.*, 2002; Woolnough,

1983). 현상과 실재에 대한 정의는 학자들마다 다르겠으나 학교 현장에서 제공하는 실험 경험들이 이러한 목적을 충분히 반영하고 있는지 면밀히 검토할 필요가 있다.

본 연구에서 과학자들이 공통적으로 경험한 현상의 한 가지 이미지는 결코 쉽게 나타나지 않는다는 것이다. Hacking (1983)의 주장처럼 현상이 여름철의 블루베리처럼 널려있다면 과학자는 더 이상 그것에 관심을 기울이지 않을 것이다. 현상이 안정적으로 창조되지 않는 것은 자연스러운 실험의 본성이다. 따라서 학생들에게 실험을 통해 현상이 안정적으로 나타나는 때를 알려주어야 하며, 어떻게 현상이 작동하는가에 대한 충분한 감각을 경험시켜주어야 한다. 이를 위해 학교 실험 교육에서는 학생들에게 요리책식 실험뿐 아니라 도전적인 실험, 다양한 해석을 도출해 낼 수 있는 실험도 함께 제시하여 실패를 경험해보게 하는 것이 바람직할 것이다. 이는 단순히 과학적 현상을 안정적으로 창조하는 것이 얼마나 어려운 일인지 말해줌으로써 실패한 실험에게 면죄부를 주는 것이 아니다. 오히려 그 반대다. 실패한 실험, 다중적인 해석이 가능한 실험은 논의의 출발점이 될 것이며 학생들에게 과학적 탐구가 무엇인지 체험할 수 있는 기회로 활용되어야 할 것이다.

셋째, 학생들로 하여금 손탄다 현상을 경험하게 함으로써 과학적 실천을 경험하게 해줄 수 있다. 역사적으로 실험 교육은 기능(skill) 또는 절차적 과정(process)을 중심으로 활동이 이루어졌다. 최근 많은 과학교육자들은 이러한 행동주의적 실험 교육을 비판하고 과학적 실천을 강조함으로써 과학 지식이 맥락에 따라 달라질 수 있으며, 과학 지식을 맥락에 맞게 가르칠 것을 강조한 바 있다 (Ault Jr & Dodick, 2010; Ford, 2008). 그럼에도 우리나라의 과학 교육과정에서는 여전히 기능중심의 접근 방식이 혼재되어 있는데, 이는 과학적 실천을 어떻게 적용할 수 있을지에 대한 연구가 여전히 부족하기 때문이다 (Oh, 2020). 이러한 맥락에서 본 연구는 과학자들이 손탄다 현상을 해결하기 위해 비언어적인 기능과 절차를 체화시키는 것뿐 아니라 물질의 특성과 원리를 실험에 적용하는 모습을 드러냄으로써 과학적 실천의 구체적 사례를 제공했다는 데 의의가 있다.

구체적으로 면담 #2의 연구 참여자 C의 사례를 살펴보면, 연구 참여자 C가 웨스턴 블랏이라는 실험을 처음 배울 때에는 실험 과정에서 실험의 목적과 절차적 과정만이 중요하게 다루어진다. 만일 연구 참여자 C가 확인하고자 하는 단백질이 절차만 잘 따르는 것만으로도 안정적으로 나타난다면, 기계적으로 움직이는 것만으로도 원하는 데이터를 얻을 수 있을 것이다. 그런데 만일 단순히 절차를 따르는 것만으로 현상을 안정적으로 창조하는데 충분하지 않다면, 현상을 안정적으로 창조하기 위해서는 적절한 지식이 요구될 것이다. 이때의 지식은 단순히 '웨스턴 블랏'이라고 하는 실험의 일반적인 원리가 아니라 현상에 대한 지식일 것이다. 가령, '단백질 A는 잘 검출이 되는데, 왜 B는 되지 않는가?', '단백질이 검출된 위치가 왜 예상한 위치와 다른가?', '어제는 잘 검출됐는데, 오늘은 왜 검출되지 않는가?'와 같은 질문에 답하기 위한 지식이 요구될 것이다. 즉, 과학적 실천에서 말하는 과학적 맥락이 중요하게 드러나는 것이다. 여기에 한 가지 주목해야 할 것은, 과학적 지식이 맥락에 맞게 사용되는 과정에서 기능과 과정 역시 중요하게 개입한다는 사실이다. 이론 혹은 맥락에 맞는 지식만으로는 현상을 안정적으로 창조할 수 없기 때문이다. 현상을 안정적으로 창조하기 위해서는 지식뿐 아니라 비언어적인 기능

이 복합적으로 작용해야 한다. 이처럼 손탄다 현상은 과학적 실천을 행위자로 하여금 촉발하며 기능중심의 실험교육 또는 강의식 실험교육, 어느 한 방향으로만 치우친 실험교육을 탈피할 수 있는 방안을 제시해준다.

마지막으로, 학생들은 손탄다 현상을 통해 불확실성(Uncertainty)을 경험하고 과학적 참여로 나아갈 수 있다. 과학적 불확실성은 과학자로 하여금 과학적 이해를 촉발하는 주요한 요인이다(Kampourakis & McCain, 2019; Chen & Qiao, 2020). 최근에는 이러한 불확실성이 학생들에게 인식적 자원으로 활용되었을 때 지식의 통합적인 이해와 논변활동에 도움이 된다는 논의가 진행된 바 있다(Han, 2020). 또한 학생들이 불확실한 상황을 해소하기 위해서는 과학적 탐구력(Scientific inquiry ability)과 과학적 사고력(Scientific thinking ability)이 요구된다. 이는 미래세대를 위한 한국형 과학교육표준(Korea Science Education Standards for the Next Generation, KSES)에서 추구하는 인간상인 ‘과학적 소양을 갖추고 더불어 살아가는 창의적인 사람’을 위한 핵심 역량에 해당한다(Song *et al.*, 2019). 따라서 학생들에게 손탄다 실험을 적절히 제공해준다면 안정화되지 않은 현상을 다루는 과정에서 불확실성을 경험하고 이를 해소하는 과정을 통해 지식의 통합적 이해와 과학적 소양인으로서의 역량을 함양할 수 있을 것이다.

본 연구는 기존의 학교에서 제공하는 과학 실험의 소재나 수업의 운영방식이 완전히 잘못되었다고 주장하는 것은 아니다. 또한, 학생들이 도전감과 실패감을 느낄만한 어려운 실험만을 가르치자고 주장하는 것도 아니다. 면담 #2와 #3에서 드러나듯이 이미 잘 정립된 실험, 누군가에게는 아주 쉬운 실험도 충분히 손탄다 현상을 야기할 수 있다. 우리가 쉽게 만들 수 있고, 늘 동일하다고 생각하는 과학적 현상을 ‘현상의 창조’라는 시각에서 접근한다면 요리책식 실험을 재해석하고 더 좋은 탐구로써 제공해줄 수 있을 것이라 기대한다.

V. 결론 및 제언

과거 기능 중심의 교육과정을 중심으로 학생들에게 과학자의 실험 과정을 그대로 모방하게 함으로써 과학적 지식의 발견과 습득을 꾀했던 실험 교육은 그것의 의의만큼이나 많은 비판과 한계가 지적되어왔다. 과학자의 실험을 학교 단위의 실험으로 옮기고자 하였던 시도는 과학자의 수년간의 노력을 누구나 간단한 절차만으로 획득할 수 있는 단순한 실험으로 만들어냈다(Kirschner, 1992; Wellington, 1998). 이 때문에 학교 실험실 교육은 여전히 실제적인 탐구 수행을 제공하지 못하고 요리책식 실험실 활동으로 이루어진다는 비판을 받아왔다(Lim *et al.*, 2010; Tobin, 1984).

이에 대해 해킹의 현상의 창조는 학교 실험 교육이 나아가야 할 방향을 분명하게 제시해준다. 그동안 학교 과학에서 현상은 발견되는 것, 즉 자연 상태에 순수하게 존재하며 과학자들에 의해 발견되기만을 기다리는 것처럼 묘사되어 왔다. 그러나 해킹에 따르면 현상은 과학자와 도구에 의해서 창조되는 것이며 과학자의 개입 없이 자연 상태에 존재하지 않는 것이다. 따라서 학교 실험 교육에서는 학생들로 하여금 현상이 어떻게 창조되는지, 어떻게 안정적으로 현상을 유지할 수 있는지를 가르쳐야 한다. 만일 과학교육에서 실험의 목표가 이론의 발견과 증명이 아닌 현상을 안정적으로 창조하는 것으로 수정

된다면 실험의 결과가 아닌 실험 과정으로 논의가 자연스럽게 옮겨질 것이며, 결과가 뻔하다고 비판받는 요리책식 실험들도 그 과정의 의미를 재고해볼 수 있는 여지를 제공할 것이다.

더 나아가서 이러한 관점의 변화는 학교 실험에서 도전적인 실험 수행을 가능하게 할 것으로 예상된다. 그동안 학교 실험에서 과학자와 같은 복잡한 실험 수행이 어려웠던 것은 학교 실험실의 공간 문제, 예산 문제, 인력 부족 등의 다양한 환경적 요인도 존재하고 있었으나 근본적으로 학생들이 실험을 수행하였을 때 실험 결과가 잘못되지 않게 하기 위한 노력에서 비롯되었다고 할 수 있다. 즉, 교사들은 학생들이 실험 수행을 통해서 실패를 경험하지 않도록 누구나 수행할 수 있는 간단한 실험을 수행하게 되었으며 때때로 사전에 조작된 실험을 학생들에게 제시하는 모습을 보였기 때문이다(Nott & Smith, 1995; Nott & Wellington, 1996). 만일 실험의 목적이 해킹이 언급한 방향으로 나아가간다면, 실패한 실험은 학생들로 하여금 새로운 논의의 출발점을 제공할 수 있으며 실험에 사용되는 원리와 지식을 자연스럽게 학습할 수 있는 좋은 기회를 제공할 것이다.

본 연구는 이언 해킹이 주장한 ‘현상의 창조’가 실험 교육에 주는 의미를 탐색한 초기 연구로 앞으로 해킹의 현상의 개념을 실험 교육에 구체적으로 적용해보는 후속 연구가 필요하다. 무엇보다 기존의 학교에서 수행되던 실험의 내용과 절차를 그대로 따르되 학생들이 현상의 창조를 경험해 볼 수 있도록 지원하기 위한 연구가 필요하다. 이에 연구자는 요리책식 실험을 그대로 따르되 학생들에게 몇 가지 질문을 제공함으로써 표준화된 실험에서 손탄다 현상을 적용한 실험이 가능할 것이라고 예상한다. 가령, 생명과학에서 ‘DNA 추출 실험’의 연구 목적은 일반적으로 ‘세포에서 DNA를 추출하고 DNA의 생화학적 특성을 이해할 수 있다’이다. 만일 여기에 ‘동일한 실험 방법을 사용하여 순도 높은 DNA를 추출하는 방법은 무엇인가?’, ‘동일한 실험 방법을 통해 극소량의 DNA를 추출하는 방법은 무엇인가?’와 같은 질문들을 던진다면 학생들이 직접적으로 손탄다 현상을 경험하지 않더라도 과학자와 유사한 탐구를 경험할 수 있을 것이라고 생각한다.

국문요약

본 연구에서는 이언 해킹(Ian Hacking)의 ‘현상의 창조’의 관점으로 과학자의 실험을 살펴보았다. 해킹의 관점에 따르면 과학적 현상은 규칙적인 것으로 과학자의 개입이나 실험 도구 없이는 자연 상태에 존재할 수 없다. 본 연구는 네 명의 생명과학자가 직접 경험한 ‘손탄다’ 현상에 대한 생각과 에피소드를 분석함으로써 과학 교육적 의미를 도출하였다. 손탄다 현상은 과학자들 사이에서 통용되는 은어로서 동일한 실험 방법과 재료를 가지고 실험을 수행함에도 결과가 일정하게 나타나지 않는 현상을 일컫는다. 연구 결과 다음과 같은 네 가지 교육적 시사점을 도출하였다. 첫째, 실험에서 단순히 실험 과정에 익숙해지는 것을 넘어 매순간 적절한 판단과 반응을 통해 당면한 문제를 해결하는 체화된 지식, 즉 비언어적인 지식의 중요성을 확인하였다. 이는 학생들에게 실제적인 탐구 경험을 제공하기 위해서 명제적 지식과 더불어 비언어적인 지식을 균형 있게 다루어야 함을 시사한다. 둘째, 실험의 이미지를 재고하고자 하였다. 과학자의 인터뷰에 의하면 현상은 드물게 나타나며 현상을 안정화하기까지는 오랜 시간이 소요된다. 반면 학교 실험의 이미지는 늘 성공적이고 안정적

이므로 이에 대한 관점의 변화가 요구된다. 셋째, 과학적 실천의 구체적인 의미를 확인할 수 있었다. 본 연구는 과학자가 상향적 맥락에 맞게 지식을 적절하게 활용하는 것을 확인하였으며 이를 바탕으로 과학적 실천을 학교 교육에 적용시킬 방안에 대해 논의하였다. 마지막으로 손탄다 현상은 불확실성을 촉발함으로써 학생들을 과학적 참여로 이끄는 기회를 제공할 것으로 예상된다. 본 연구를 통해 학교 실험 교육이 요리책식 실험을 탈피하여 학생들에게 과학적 실천을 경험시키려는 노력에 기여할 것으로 기대한다.

주제어 : 이언 해킹, 현상의 창조, 손탄다, 과학적 실천, 과학자, 실험 교육

Reference

- Ault Jr, C. R., & Dodick, J. (2010). Tracking the Footprints Puzzle: The problematic persistence of science as process in teaching the nature and culture of science. *Science Education*, 94(6), 1092-1122.
- Bae, S. S. (2013). The Meaning and Problems of Research Methods in Phenomenological Pedagogy. *Journal of The Society of Philosophical Studies*, 125, 191-214.
- Byun, T., Baek, J., Shim, H.-P., & Lee, D. (2019). An investigation on the implementation of the 'scientific inquiry experiment' of the 2015 revised curriculum. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 39(5), 669-679.
- Buchwald, J. Z. (1979). The Hall effect and Maxwellian electrodynamics in the 1880's. Part I: The discovery of a new electric field. *Centaurus*, 23(1), 51-99.
- Chang, H. (2012). *Is water H₂O?: Evidence, realism and pluralism* (Vol. 293). Springer Science & Business Media.
- Chen, Y. C., & Qiao, X. (2020). Using students' epistemic uncertainty as a pedagogical resource to develop knowledge in argumentation. *International Journal of Science Education*, 42(13), 2145-2180.
- Choi, C. I., & Lee, S.-K. (2016). Reconsidering the Meanings of Experiments and Instruments Based on the Analysis of Chemistry Experiments in Textbooks. *Journal of the Korean Chemical Society*, 60(4).
- Crawford, B. A. (2014). From inquiry to scientific practices in the science classroom *Handbook of research on science education*, volume II (pp. 529-556): Routledge.
- Creswell, J. W. (2013). *Qualitative inquiry and research design: Choosing Among Five Approaches*, 3rd Edition. Thousand Oaks, CA: SAGE Publications, Inc.
- Dunbar, K. (1995). How scientists really reason: Scientific reasoning in real-world laboratories. *The nature of insight*, 18, 365-395.
- Finley, F. N. (1983). Science processes. *Journal of Research in Science Teaching*, 20(1), 47-54.
- Ford, M. (2008). 'Grasp of practice' as a reasoning resource for inquiry and nature of science understanding. *Science & Education*, 17(2), 147-177.
- Gee, B., & Clackson, S. G. (1992). The Origin of Practical Work in the English School Science Curriculum. *School Science Review*, 73(265), 79-83.
- Giorgi, A. (1985). *Phenomenology and Psychological Research*. Pittsburgh, PA: Duquesne university press.
- Hacking, I. (1983). *Representing and intervening: Introductory topics in the philosophy of natural science*: Cambridge university press.
- Hacking, I. (1984). Experimentation and scientific realism *Science and the Quest for Reality* (pp. 162-181): Springer.
- Han, M. (2020). Escaping Uncertainty: Elementary Students' Emotional-Cognitive Rebuttals in the Argumentation of. *Journal of The Korean Association For Science Education*, 40(1), 1-12.
- Hodson, D. (1996). Laboratory work as scientific method: Three decades of confusion and distortion. *Journal of Curriculum Studies*, 28(2), 115-135.
- Kampourakis, K., & McCain, K. (2019). *Uncertainty: How it makes science advance*. Oxford University Press.
- Kang, J. (2021). A Phenomenological Study on the Science Anxiety Experience of Science-Gifted Middle School Students. *Journal of The Korean Association For Science Education*, 41(4), 283-295.
- Kirschner, P. A. (1992). Epistemology, practical work and academic skills in science education. *Science & Education*, 1(3), 273-299.
- Latour, B., & Woolgar, S. (2013). *Laboratory life: The construction of scientific facts*: Princeton University Press.
- Lederman, J. S., Lederman, N. G., Bartos, S. A., Bartels, S. L., Meyer, A. A., & Schwartz, R. S. (2014). Meaningful assessment of learners' understandings about scientific inquiry—The views about scientific inquiry (VASI) questionnaire. *Journal of Research in Science Teaching*, 51(1), 65-83.
- Lee, S. (2004). *A Philosophical approach to experimentation*. Seokwangsa.
- Lee, S.-K., Han, J., Lee, J., & Noh, T. (2015). Characteristics of Student Inquiry Found in Project-based Science Practices: Focusing on Theory-Evidence-Method Coordinations and Skills in Using Tools. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 35(4), 599-608.
- Lee, J.-W., & Oh, I. (2016). Phenomenological Study on a School Counselor's Professional Development Experience. *Korean Journal of Counseling*, 17(4), 351-372.
- Lee, J.-H. (2021). A self-narrative about "education" and "training" of basic military training: Reinterpretation of chemistry experiment through rethinking the concept of "training". *Journal of Education & Culture (JOEC)*, 27(6), 715-737.
- Lim, S. M., Yang, I.-H., Kim, S.-M., Hong, E.-J., & Lim, J.-K. (2010). Investigation on the Difficulties during Elementary Pre-service Teachers' Open-inquiry Activities. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 30(2), 291-303.
- Lynch, M. (2017). *Art and artifact in laboratory science: A study of shop work and shoptalk in a research laboratory*: Routledge.
- Matthews, M. R. (2012). Changing the focus: From nature of science (NOS) to features of science (FOS) *Advances in nature of science research* (pp. 3-26): Springer.
- Maxwell, J. C. (1873). *A treatise on electricity and magnetism* (Vol. 1): Clarendon press.
- Michael, J., & Forman, A. (2006). *Redefining Disciplinary Learning in Classroom Contexts*.
- Millar, R., Tiberghien, A., & Maréchal, J. F. L. (2002). Varieties of labwork: A way of profiling labwork tasks. In *Teaching and learning in the science laboratory* (pp. 9-20). Springer, Dordrecht.
- Millar, R. (2005). What is 'scientific method' and can it be taught? *Teaching science* (pp. 172-185): Routledge.
- National Research Council. (2000). *Inquiry and the national science education standards: A guide for teaching and learning*: National Academies Press.
- National Research Council. (2012). *A framework for K-12 science education: Practices, crosscutting concepts, and core ideas*. Washington, D.C.: The National Academies Press.
- NGSS Lead States. (2013). *Next generation science standards: For states, by states*: The National Academies Press Washington, DC.
- 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.
- Nott, M., & Wellington, J. (1996). When the black box springs open: practical work in schools and the nature of science. *International Journal of Science Education*, 18(7), 807-818.
- 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.
- Sanderson, B. A., & Kratochvil, D. W. (1971). *Science-A Process Approach*, Product Development Report No. 8.
- Schwab, J. J. (1982). *Science, curriculum, and liberal education: Selected essays*: University of Chicago Press.
- Soler, L., Zwart, S., Lynch, M., & Israel-Jost, V. (2014). *Science after the practice turn in the philosophy, history, and social studies of science*: Routledge.
- Song, J. (2006). J. J. Schwab's Life and His Ideas of Science Education. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 26(7), 856-869.
- Song, J., Kang, S.-J., 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.
- The Ministry of Education. (2015). *Science curriculum*. Sejong: The Ministry of Education.
- Tobin, K. (1984). Avoiding cookbook science. *Science Activities*, 21(2), 10-15.
- Wellington, J. (1981). What's supposed to happen, sir?: Some problems with discovery learning. *The School Science Review*, 63, 167-173.
- Wellington, J. (1998). Practical work in school science. *Practical work in school science: Which way now*, 35-51.
- Wideen, M. F. (1975). Comparison of Student Outcomes for Science-A

- Process Approach and Traditional Science Teaching for Third, Fourth, Fifth, and Sixth Grade Classes: A Product Evaluation. *Journal of Research in Science Teaching*, 12(1), 31-39.
- 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.-H., Jeong, J.-S., Kwon, Y.-J., Jeong, J.-W., Hur, M., & Oh, C.-H. (2006). An intensive interview study on the process of scientists' science knowledge generation. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 26(1), 88-98.

저자 정보

최진현(서울대학교 학생)
전상학(서울대학교 교수)