

과학 탐구의 본성에 초점을 둔 실험의 설계와 시범 적용 —드라이아이스 승화 실험에서 드러나는 인식론적 논제를 중심으로—

박정우¹, 이선경^{*}, 이경건¹, 심한수², 신명경³

¹서울대학교, ²계원예술대학교, ³경인교육대학교

Design and Pilot Application of an Experiment Focusing on the Nature of Scientific Inquiry: Focus on the Epistemological Issues in the Process of Dry Ice Sublimation Experiment

Jeongwoo Park¹, Sun-Kyung Lee^{*}, Gyeong-Geon Lee¹, Han Su Shim², Myeong-Kyeong Shin³

¹Seoul National University, ²Kaywon University of Art & Design, ³Gyeongin National University of Education

ARTICLE INFO

Article history:

Received 12 December 2018

Received in revised form

21 January 2019

11 February 2019

11 March 2019

Accepted 25 March 2019

Keywords:

Epistemological Issues, Inquiry,
Experiment, Stable Enquiry,
Fluid Enquiry

ABSTRACT

The purpose of this study is to design and apply a pilot inquiry experiment focusing on the epistemological issues of scientific activities, and derive educational implications by analyzing experimental activities and reflective discussions. Three graduate students who major in science education participated in the study voluntarily. Participants showed the characteristics of stable enquiry in Experiment 1. However, the small but continuous changes in Experiment 2 led the experiment to a phase of fluid enquiry seeking new theories. Participants mobilized various resources, proposed new hypotheses, and models and requested additional experiments to verify them. In the process of reflective discussions, the participants led to the following three epistemological issues. First, at the beginning of the experiment, their observations were theoretically dependent. Second, when the observations were no longer coherent with theory, they face a crisis, and the adjustment of observation and theory proceeds. Third, stable enquiry and fluid enquiry are performed according to the relationship between observation and theory. The educational implications of school science inquiry based on the above process and results are as follows: First, this study shows that fluid enquiry can follow stable enquiry naturally, and examples of the activities are presented together. Second, in this study, it was confirmed that participants could draw up epistemological issues based on their experiences through reflective discussions following inquiry.

1. 서론

‘탐구 실험’은 다른 교과에서 찾아보기 어려운 학교 과학의 고유하고 독특한 활동이다. 일반적으로 ‘탐구’와 ‘실험’은 본질적으로 동일한 의미를 갖고 있으며 실험은 탐구의 한 방편 혹은 절차로 여겨진다(Wardle, 2002). ‘탐구’는 과학의 과정이자 과학자 활동의 핵심으로서 학교교육에서 학생들이 경험해야 할 하나의 지향점의 의미를 가지며, 학교 과학에서는 ‘실험’을 통해 학생들이 ‘탐구’를 경험하게 될 것으로 기대한다.

Hodson(1996)에 따르면 실험의 목적은 ‘과학 내용의 학습’ 외에도 ‘과학 방법의 학습’과 ‘과학 본성의 학습’으로 분류되며, Wellington(2002b)은 과학 수업에서 실험이 필요한 이유를 설명하기 위해 인지적 영역 외에, 정의적 및 기능적 영역을 함께 제시하였다. 학교 과학 교육에서 실험 활동의 목적을 과학교육 전문가 델파이 연구로 정리한 Yang *et al.*(2006)의 연구에 따르면, 대체로 과학교육 전문가들은 과학 내용의 학습, 과학 방법의 학습, 혹은 인지적, 정의적, 기능적 영역에 해당되는 내용을 실험 활동의 목적으로 합의하였다. 또한 과학 본성의 학습에 해당되는 내용으로는 과학적 지식 생성 과정에 대한

이해, 실험의 필요성 인식 등을 언급하였다(Yang *et al.*, 2006). 이처럼 과학의 본성은 탐구에 대한 연구에서 끊임없이 하나의 축으로 등장하지만, 탐구 실험을 설계할 때 흔히 간과되기 쉽다. 일부 ‘과학의 본성 이해’를 교육적 목적으로 한 탐구 실험들의 필요성이 논의되고 있지만, 이것의 구체적인 개발을 위해서는 ‘과학 내용의 학습’이나 ‘과학 방법의 학습’을 목표로 한 탐구 실험들에 비해 좀 더 복잡한 논의가 필요하다.

최근 자유 탐구 등의 형태로 과학자의 활동인 참 탐구(authentic inquiry)의 특징을 교실 현장에 반영하고자 하는 노력이 활발하게 진행 중이며, 학생들은 이를 통해 다양한 과학의 본성과 관련되어 암묵적인 경험을 하게 될 것으로 기대한다. 하지만 교실 현장에 적용되는 실험은 표준화된 실험이나 단순탐구 형태의 실험이 대부분이다(Chinn, & Malhotra, 2002; Wellington, 2002a). Chinn, & Malhotra(2002)에 따르면, 과학 교과서에 수록되어 있는 탐구 실험의 대부분이 단순 탐구(단순 실험(simple experiment), 단순 관찰(simple observation), 단순 예증(simple illustration))이며, 이와 같은 결과는 국내 연구에서도 유사하게 나타났다(Kang, & Lee, 2013; Kim, & Moon, 2003). ‘표준화된’ 탐구 실험은 (1) 학교 실험실이 지닌 분명한 제약 조건과

* 교신저자 : 이선경 (sunlee2061@gmail.com)

** 이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2017R1A2B400995)

http://dx.doi.org/10.14697/jkase.2019.39.2.173

수업 시간표의 시간 제약 내에서 가능하고 (2) 법제화된 교육과정의 형식이나 ‘조건’에 잘 맞으며 (3) 단일한 틀을 이용하여 평가할 수 있고, 학생들이 적절한 시기에 어떤 수준에 도달하도록 맞출 수 있게 고안된 탐구 실험을 의미한다(Wellington, 2002a). 표준화된 탐구 실험은 교육과정의 틀을 잘 따르는 실험이지만, 지침서만 따라하면 학급의 누구라도 정답을 얻을 수 있어 ‘바보라도 할 수 있는’(Kirschner, 1992) 실험을 양산했다는 비판을 받기도 한다. 이러한 단순탐구나 표준화된 실험에서 과학의 본성을 직접적으로 다루는 경우는 거의 없으며, 몇몇의 연구자들은 학교 과학의 탐구 실험이 과학자의 활동인 참탐구의 특징을 반영하지 못하고 ‘단순 탐구’로 남을 것을 염려한다(Chinn, & Melhotra, 2002; Kim, & Song, 2004; Roth, 1995). 이처럼 과학의 본성에 대한 이해는 과학적 소양인이 갖추어야 할 영역으로 간주되고 있지만(Jeon *et al.*, 2017), 교육과정은 과학의 본성에 대한 특징을 제시하는데 국한되어 있으며, 표준화된 탐구 또는 단순 탐구 형태의 과학적 탐구는 과학의 본성과 긴밀하게 연결되지 못하고 있다.

하지만 이 같은 논의가 학교에서 단순 탐구는 지양되어야 하며, 참탐구만이 수행되어야 한다는 것을 의미하지는 않는다. 단순탐구는 그 자체로 학교 실험에서 중요한 역할을 차지한다. Barton(2002)이 말한 바와 같이 직접적인 경험 외에는 과학 현상을 이해하도록 도울 다른 방법이 종종 없는 경우가 있기 때문이다. 탐구 실험은 단순히 언어만으로는 전달하기 어려운 이론, 설명, 개념을 학생들이 이해하는데 도움을 주기 위해 수행된다. 따라서 과학 이론을 확인하거나 예시하는 등의 단순 탐구 실험(예시적 실험 실험)은 복잡한 과학자 활동과 달리 ‘단순한’ 형태로 제공되지만 교육적 의미와 가치를 갖는 유용한 활동이 되기도 한다(Woolnough, 2002).

과학의 본성을 탐구 실험에서 언제, 어떻게 다루어야 하는가에 대해 다양한 논의와 연구가 진행되어왔다. 그 중 첫 번째 논의는 ‘과학의 본성 이해’를 ‘과학 내용의 학습’과 분리하여 다루어야 하는가, 함께 다루어야 하는가에 관한 것이다. 전자는 과학 내용의 이해, 인식론적 이해 등 여러 가지 탐구의 목적을 동시에 성취하려고 할 때, 탐구 실험에서 인식론적 이해 즉, 과학의 본성과 관련된 탐구 실험의 목적은 상대적으로 취약하게 다루어질 수 있다고 주장한다(Nott, & Wellington, 1996; Yang *et al.*, 2006). 반면, 후자는 ‘과학의 본성 이해’는 과학 개념을 이해하고 발달시켜가는 과정에서 함께 추구되어야 할 것으로 보는 관점으로, 과학의 본성 이해가 개념적으로 풍부한 맥락에 삽입될 때 보다 성공적이고 흥미로울 수 있다고 주장한다(Hodson, 2008). 이는 과학의 본성 이해를 탐구 실험의 맥락에서 다루되 상대적으로 취약하게 다루어지지 않도록 주의하여야 할 것을 의미한다. 두 번째 논의는 과학의 본성을 어떻게 탐구 실험에 포함시킬 것인가에 관한 것이다. 과학의 본성 이해에 관련된 탐구 실험의 초기 연구에서는 과학의 본성 이해를 암묵적 차원의 과정으로 보았으며, 탐구 실험의 부산물로 취급하였다(Kim *et al.*, 2008; Moss *et al.*, 1998). 하지만 최근 연구의 흐름에서는 과학의 본성을 탐구의 본성과 같은 것으로 보고 과학적 실험에 참여하면서 명시적으로 가르쳐야 한다는 주장이 주를 이룬다(Lehrer, & Schauble, 2012). 이를 위해 다양한 연구에서 과학의 본성을 명시적으로 가르치기 위해 교과서에 수록된 실험보다는 실제 과학자들의 탐구와 유사한 상황에서 이루어 지도록 하는 방안이 강조되고 있다(AAAS, 1993; NRC, 2000, 2012;

Roychoudhury, & Roth, 1996). 여러 연구자들은 실제로 개방적인 참 탐구 맥락에 참여한 학생들이 과학의 본성에 대해 유의미한 학습을 성취하였다는 결과를 보고하기도 하였다(Kim, & Kim 2007; Schwartz, Lederman, & Crawford 2004). 최근 과학의 본성을 명시적으로 다루는 비교적 단순한 탐구 실험들이 일부 개발 및 적용되고는 있다. 하지만 대부분의 탐구 실험들은 관찰 사실 등을 바탕으로 블랙박스 내부 구조를 설명하는 모형을 만들고 검토하게 하는 등, 범교과적인 맥락에서 과학의 본성을 다룬다는 한계를 지니고 있다(Kim, 2012; McComas, 2002; Park *et al.*, 2018). 세 번째 논의는 과학의 본성을 언제 가르쳐야 하는가에 관한 것이다. 즉, 이 논의는 학생들이 탐구 실험을 수행하는 과정에서 필요에 따라 과학의 본성 이해를 가르쳐야 할 것인지, 아니면 그러한 상황을 겪기 전에 미리 가르쳐야 하는 것인지에 관한 것이다. Hodson (1996)의 주장과 같이, 두 방식이 자연스럽게 혼합되는 것이 적절한 해결책이 될 수도 있을 것이다. 즉, 학생이 특정한 과학의 본성 이해를 필요로 하는 상황을 겪을 수 있도록 실험을 설계 하고, 그때 그것과 관련된 과학의 본성을 가르치는 것이 하나의 방법이 될 수도 있을 것이다.

이 연구는 과학 탐구의 본성 즉, 인식론적 논제에 초점을 둔 명시적 탐구 실험의 필요성에서 출발하였다. 과학의 본성에 대한 이해는 과학적 소양인이 갖추어야 할 영역으로 간주되고 있지만(Jeon *et al.*, 2017), 교육과정에는 과학의 본성의 특징 제시에 국한되어 있으며, 과학적 탐구와 긴밀하게 연결시키지 못하고 있다. 교과서 내에 과학 탐구의 본성, 특히 인식론적 논제를 명시화하는 것을 목적으로 한 탐구 실험은 찾기 어렵다. 이 연구에서는 과학의 본성을 탐구 실험의 본성과 같은 것(Duschl, & Grandy, 2013; Lehrer, & Schauble, 2012)으로 간주하고, 교육과정의 연장선상에 있는 특정 주제에 적합한 탐구 실험을 설계 및 시범 적용하여 학생의 탐구 과정을 탐색하고, 탐구 실험에 뒤이은 반성적 논의에서 나타나는 인식론적 논제를 탐색하고자 하였다.

II. 연구 방법

1. 연구의 맥락

본 연구는 과학 탐구의 본성에 초점을 둔 탐구 실험을 시범 적용하고, 실험 과정 및 반성적 논의를 탐색하는 과정으로 이루어졌다. 본 연구의 실험에서 학생이 주요 이론으로 설정할 것으로 예상되는 질량 보존의 법칙은 중학교에서 다루고 있으므로, 초등학생은 질량 보존의 법칙의 이론을 바탕으로 현상을 관찰하지 않을 것이다. 즉, 본 탐구 실험은 중학교 이상의 학생을 대상으로 설계되었다. 하지만 연구의 초점이 과학 탐구의 본성을 명시적으로 논의하는 교육적 가능성을 탐색하는데 있기 때문에, 연구진은 탐구 실험에 참여하고 활동을 반추하면서 풍부한 정보를 제공해줄 수 있는 예비교사들을 대상으로 우선적으로 탐구 실험을 시범 적용하여 탐구 실험의 가능성을 확인해 보고자 하였다. 본 연구의 결과는 일차적으로 예비교사 교육에 시사점을 줄 것으로 기대하며, 추가적인 논의 및 적용을 통해 학교 과학 교육의 탐구실험 전반에 대한 확장된 논의를 이끌 수도 있을 것으로 기대한다.

가. 연구참여자

연구를 위하여, 사범대학 과학교육의 대학원생 3명이 자발적으로 연구에 참여하였다(Table 1). 연구참여자들은 중등 및 대학 생활을 거치면서 실험 경험이 풍부하고, 사전에 서로 친분이 있었으며, 토론하는 것에 거부감이 없고 매우 익숙하였고, 탐구 실험은 약 2시간 동안 진행되었다. 한 명의 연구자(연구자 A)는 사회자 역할을 하며 실험 및 토론을 진행하였으며, 두 명의 연구자(이후, 연구자 B, 연구자 C)는 실험을 보조하였다. 연구참여자들은 실험 참여 및 반성적 논의 과정을 녹취하는 것에 모두 동의하였고, 개인 정보가 노출되지 않는 한에서 녹취록을 연구 자료로 활용하는 것에 대해서도 흔쾌히 동의하였다. 연구 결과에서 연구 참여자의 이름은 모두 가명으로 제시하였다.

Table 1. Participants

	전공	과정	성별
선일	생물교육	석사과정	남
종아	생물교육	석사과정	여
세진	생물교육	박사과정	여

나. 탐구 실험의 설계와 시범 적용

인식론적 논제의 정의 및 도출을 위해 PISA의 과학 평가틀을 참고하였다. PISA는 과학 평가틀을 맥락, 역량, 지식, 태도로 구성하고 있는데, 이 중 지식의 하위 요소로 인식론적 지식을 다루고 있다(OECD, 2016). 지식은 실생활에 필요한 문제를 해결하기 위해서 요구되는 과학 관련 지식으로, 내용 지식과 절차적 지식, 인식론적 지식으로 구분되는데, 내용 지식은 과학 지식을 의미하며, 절차적 지식과 인식론적 지식은 과학에 대한 지식을 의미한다. 구체적으로 인식론적 지식은 과학의 본성과 과학의 한계를 이해하는 것을 의미하여 그 하위 요소에는 ‘과학적 관찰, 사실, 가설, 모형 및 이론 본성’, ‘기술과 구별되는 과학의 목적 및 목표’, ‘과학의 가치’, ‘과학에서 사용하는 추론의 본성’, ‘과학에서 자료와 추론에 의해 과학적 주장이 지지되는 방법’, ‘지식을 확립하는데 있어 다양한 형태의 실증적 탐구의 기능, 그 목표, 그리고 그것에 대한 설계’, ‘측정 오차가 과학적 지식의 신뢰도에 미치는 영향’, ‘물리적인 체계 및 추상적 모형의 사용 및 역할과 그것의 한계’, ‘협력 및 비평의 역할과 과학적 주장에 대한 신뢰를 확보하는 것에 대한 동료평가의 도움 정도’, ‘사회적, 기술적 쟁점을 확인하고 언급하는데 있어서 다른 형태의 지식과 더불어 과학적 지식이 갖는 역할’이 있다(Ku *et al.*, 2016). 이와 같은 과학의 본성에 대한 이해를 위한 논제들을 본 연구에서는 인식론적 논제로 보고자 하였다. 이러한 인식론적 논제들은 교사가 학생들에게 제공할 수도 있고, 학생이 스스로 제안할 수도 있을 것이다.

다수의 연구에서 과학 탐구의 핵심적인 특징을 ‘증거와 설명의 조정’으로 꼽는 것을 고려하여(Grandy, & Duschl, 2007; Lee *et al.*, 2012), 본 연구에서는 인식론적 지식의 하위요소 중에서 ‘과학적 관찰, 사실, 가설, 모형 및 이론의 본성’에 초점 맞춰 탐구 활동을 구성하였다. 도구에 따라 관찰 사실이 다르게 나타나는 두 개의 단순 탐구를 연달아 수행하며 관찰과 관련된 과학의 본성에 대한 이해를 필요로

하는 상황을 겪고 인식론적 논제를 명시화할 수 있을 것으로 기대하였다(Table 2). 실험 초기에 연구진은 연구참여자에게 실험의 목적과 주제에 대해 알려주지 않았다. 단지, 실험 1과 실험 2에 대해 연구참여자의 관찰 사실과 이론을 기록하도록 하였으며, 이를 바탕으로 반성적 논의과정을 거치도록 안내하였다. 반성적 논의 단계에서 연구자들은 학생들의 인식론적 논의가 ‘과학적 관찰, 사실, 가설, 모형 및 이론의 본성’에만 국한되도록 제한하지 않았다. 학생들에게는 자유롭게 논의하면서 다양한 인식론적 논의를 도출할 수 있는 기회를 제공하였다.

Table 2. Design of Activity

활동	내용
실험1	g 단위 저울을 사용하여 지퍼백 안의 드라이아이스 무게 변화 관찰
실험2	.01 g 단위 저울을 사용하여 지퍼백 안의 드라이아이스 무게 변화 관찰
반성적 논의 실험1과 실험 2를 돌아보며 인식론적 논제 도출	

탐구 실험의 주제는 “드라이아이스 무게 측정”이다(연구참여자에게는 공시하지 않았다). 이 실험에서 연구참여자는 고체인 드라이아이스를 지퍼백에 넣고 드라이아이스가 이산화탄소로 승화하는 동안 지퍼백의 무게 변화가 나타나는가를 전자저울로 관찰하게 된다. 실험은 두 단계로 계획되었다. 실험 1과 2의 초기에 전자저울을 제외한 모든 재료와 도구는 모두 동량 혹은 동일한 것을 사용하였다. 전자저울의 경우, 실험 1에서는 g단위를 사용하고 실험 2에서는 0.01 g단위를 사용하였다. 탐구 실험은 크게 실험 1(g 단위 저울을 이용한 실험), 실험 2(.01 g 단위 저울을 이용한 실험)와 반성적 논의의 3단계로 구성되었다(Table 2). 실험 1에서 연구진은 약 1.2 g의 드라이아이스를 지퍼백에 넣고 밀봉하여 아크릴 상자에 넣은 후 g단위 전자저울에 놓고 실험을 실시하였으며, 실험 2에서는 .01 g 단위 전자저울을 사용하여 동일하게 진행하였다.

실험의 원리는 다음과 같다. 드라이아이스가 이산화탄소로 변할 때 부피가 증가하는데, 이 부피 증가는 지퍼백에 작용하는 부력을 증가시킨다. 부력은 중력과 반대로 작용하므로 결과적으로 드라이아이스가 들어있는 지퍼백의 무게가 감소하게 된다. 지퍼백 내부의 물질들의 질량은 보존되지만, 이 실험에서 저울을 통해 측정되는 것은 질량이 아니라 무게이므로 결과적으로 저울의 눈금이 줄어들게 되는 것이다. 이 연구에서는 드라이아이스의 승화 후에 줄어드는 지퍼백의 무게가 1 g 이내가 되도록 실험을 설계하였다. 실험에 사용할 드라이아이스는 약 1.2 g으로 산출되었다.1)

- 1) 구체적인 무게의 변화량 $\Delta W(g)$ 은 아래와 같이 구할 수 있다. 실험실 온도가 $t(^{\circ}C)$ 일 때, 질량 $m(g)$ 의 드라이아이스가 승화되어 생기는 이산화탄소 기체의 부피 $\Delta V(L)$ 는 식 (1)과 같다.

$$\Delta V = \frac{22.4(1 + \frac{t}{273.15})}{44} \times m \quad (1)$$

공기의 밀도가 $\rho(g/L)$, 대기압이 $P(atm)$, 실험실 온도가 $t(^{\circ}C)$ 일 때, 공기의 밀도 $\rho(g/L)$ 는 식 (2)와 같다(Fritschen, & Gay, 2012).

$$\rho = \frac{1.293P}{1 + 0.00367t} \quad (2)$$

연구참여자들은 실험을 진행하면서 활동지를 작성하도록 안내받았다. 활동지는 각 실험에 대하여 아래의 세 가지 질문으로 구성되었다. 아래 질문에 대한 기록 내용은 실험을 마친 후 ‘반성적 논의’ 과정에서 활용되었다.

- (1) 관찰한 것은 무엇인가요?
- (2) 위의 관찰한 것들 중에서 실험에 중요한 관찰 사항은 무엇인지 오픈을 해 주세요.
- (3) 이 실험에서 주장하는 과학적 설명은 무엇인가요?

이 연구의 초점이 탐구 활동의 본성에 관한 것이기 때문에, 실험 과정은 대체로 구조화된 동시에 실험의 변경을 허용하는 부분적으로 개방된 형식을 취하였다. 곧 실험 1과 실험 2은 당초의 실험 설계에 따라 어느 정도 구조화된 틀을 따라 진행되었으며, 이와 함께 실험 과정 전반에서 연구참여자들이 새로운 가설을 제안하고 실험을 추가적으로 실행할 수 있었다. 연구진은 실험 과정에서 연구참여자들의 요청에 따라 실험 장치 혹은 절차의 일부 변경을 할 수 있도록 허용하였다.

실험을 마친 후 연구진은 연구참여자에게 실험 과정에 대한 반성적 논의(reflective discussions)를 하도록 안내하였다. 연구진은 연구참여자들에게 활동지의 질문에 대한 응답 내용을 상호 공유하고 활동지에 적은 내용을 바탕으로 실험 과정 및 활동 경험을 반추하면서 논의하도록 요청하였다.

2. 자료 수집과 분석

연구를 위한 주 자료원은 탐구 실험에서 연구참여자들의 실험 과정에 관한 비디오 녹화물과 활동지였다. 연구참여자들의 실험 과정 및 논의과정을 담은 녹화물은 모두 전사되었다. 자료의 분석은 세 단계로 이루어졌다. 첫째 단계에서 연구진은 실험 과정과 반성적 논의에 대하여 열린 형태의 토론을 진행하였다. 탐구 실험이 실험 1, 실험 2, 반성적 논의로 구성되었고 실험 2의 실험 과정에서 연구참여자의 요청에 따라 일부 변경이 허용된 형태로 진행되었기 때문에, 연구진은 실험 과정의 흐름과 맥락, 그리고 특징적 사항에 대한 이해를 상호 공유하는데 토론의 주안점을 두었다. 연구진은 특정한 분석틀을 염두에 두지 않고 실험 과정의 흐름을 통합적으로 이해하고 다각적으로 해석하여 그 의미를 이해하고자 하였다. 둘째 단계에서는 첫 단계에

드라이아이스가 들어 있는 지퍼백의 부피 변화는 지퍼백에 작용하는 부력을 $\rho \Delta V$ 만큼 증가시키며, 따라서 저울에 나타나는 무게가 감소한다. 결과적으로 대기압이 $P(\text{atm})$, 실험실 온도가 $t \text{ } ^\circ\text{C}$ 일 때 저울에 나타나는 무게의 변화량 $\Delta W(\text{g})$ 은 식 (3)과 같다.

$$\Delta W = -\rho \Delta V = -\frac{1.293P}{1 + 0.00367t} \times \frac{22.4(1 + \frac{t}{273.15})}{44} \quad (3)$$

이상의 원리를 토대로, 이 연구에서는 드라이아이스의 승화 후에 줄어드는 지퍼백의 무게가 1 g 이내가 되도록 실험을 설계하였다. 식 (4)와 같이 상온(25 $^\circ\text{C}$), 1기압에서 1.2 g의 드라이아이스가 승화할 때 지퍼백의 무게는 0.79 g 줄어드는 것으로 예상할 수 있다. 식 계산에 따라, 실험에 사용할 드라이아이스는 약 1.2 g으로 산출되었다.

$$\Delta W = -\frac{1.293 \times 1}{1 + 0.00367 \times 20} \times \frac{22.4(1 + \frac{25}{273.15})}{44} = -0.79(\text{g}) \quad (4)$$

서의 토론 내용을 참조하면서, 1인의 연구자(연구자 B)가 수업 녹화 영상물과 전사 자료 및 활동지를 주도적으로 분석하였다. 자료의 분석을 순환적으로 반복한 결과, 실험은 크게 두 가지 국면 즉, 여러 가지 관찰 사항 중에서 중요한 관찰 사항이 연구참여자의 이론에 의존하는 국면과, 관찰 결과가 더 이상 이론에 의존하지 않는 새로운 국면의 전환으로 파악되었다. 이론의 안정성 또는 견고성에 초점을 맞춰 학생의 탐구를 구분한 Schwab(1962)의 연구는 이러한 연구참여자의 두 국면을 해석할 수 있는 적절한 관점을 제공한다. Schwab(1962)에 따르면 탐구는 ‘안정적 탐구(stable enquiry)’와 ‘유동적 탐구(fluid enquiry)’의 두 가지로 구분된다. 학생들은 안정적 탐구 과정에서 원리를 수용하고 그 원리를 확실한 사실로 취급하지만, 유동적 탐구 과정에서는 실패를 연구하여 새로운 원리들을 개발한다(Schwab, 1962). 이론이 견고한 안정적 탐구과정과 새로운 이론들을 시험하는 유동적 탐구에서 드러나는 학생의 실험은 연구에서 다루고자 하는 인식론적 지식의 하위 요소인 ‘과학적 관찰, 사실, 가설, 모형 및 이론의 본성’을 드러나게 할 것으로 기대한다. 이에 연구진은 Schwab(1962)이 제시한 ‘안정적 탐구’와 ‘유동적 탐구’를 차용하여 실험의 두 개 국면과, 두 탐구 사이의 ‘위기의 국면’을 명명하고, 각 활동의 국면에서 드러난 다양한 특징을 확인하였다. 더불어, 전체 활동 과정 및 ‘반성적 논의’ 과정에서 다루어진 인식론적 논제를 재확인하고 범주화하였다. 셋째 단계에서 연구진은 둘째 단계에서 수행된 분석 자료의 정합성과 일관성을 재검토하는 작업을 거쳤으며, 필요한 경우 통합 및 재조정하였다. 연구진은 지속적 협의를 통해 결과 해석을 논의하고 수정 및 보완하여 자료 분석 및 해석의 타당도를 확보하였다.

III. 연구 결과

연구 결과에서는 탐구 실험에 대하여 ‘안정적 탐구’에서 ‘위기’에 봉착한 후 ‘유동적 탐구’ 국면으로 전개되는 과정을 상세히 기술하고, 탐구에 뒤이은 반성적 논의에서 나타난 인식론적 논제를 다룬다.

1. 안정적 탐구(stable enquiry)의 국면

실험 1은 안정적 탐구의 국면 즉, 기존의 개념체계를 보다 확장하고 세련시켜 나가는 과정을 보여주었다. 간단히 말해, 건축의 마스터 플랜에 대해 의문을 품지 않고 다만 주어진 것으로 받아들이며 그 속에서 문제를 해결해 나가는 것(Schwab, 1962)으로 비유할 수 있다. 연구참여자들은 실험 장치와 연구진의 시범을 보면서 이 실험이 ‘질량보존의 법칙’을 재현하기 위한 실험이라고 간파했으며(발췌 1), 그들이 인식한 실험의 목적에 맞추어 연구진의 요청에 따라 실험을 진행하였으며 실험 과정은 안정적 탐구의 특징을 보여주었다.

연구참여자들은 실험을 시작할 때, 실험 장치와 연구자의 시범을 보고 이미 실험 1의 목적이 “질량 보존의 법칙”을 재현하는 것으로 확신하였다. 따라서 실험 중에 저울의 눈금이 변하지 않을 것이라고 예상하고 관찰을 시작하였다. 선일은 질량 보존의 법칙을 관찰하였고 기록할 정도로 질량 보존의 법칙이라는 이론은 실험 1에서 견고하게 유지되었다(Table 3).

Table 3. Students' Observations of Experiment 1

특징	선일	종아	세진	
무게 (양적)	드라이아이스	드라이아이스 1 g	0.001 kg 드라이아이스 1 g	0.001 kg
	전체	246 g	무게: 0.246 kg	0.246 kg
	지퍼백	지퍼백 5 g	지퍼백 5 g	Case 5 g 지퍼백
		드라이아이스+지퍼백 6 g	지퍼백+드라이아이스 6 g*	
결과적 설명	무게의 변화 유무*		무게변화가 없다*	저울눈금이 그대로* 드라이아이스 1 g -> 지퍼백 내 공기 1 g
크기 부피(질적)	지퍼백	지퍼백 부푸는 정도 고체 기체상태의 부피 체크 공금	지퍼백이 생각보다 많이 부퐁다	지퍼백이 부풀어 오른다*
	드라이아이스	드라이아이스변화	드라이아이스 크기가 작아진다*	드라이아이스가 작아짐
기타	지퍼백 주변에 물방울 생김	지퍼백에 물방울이 맺힌다*	드라이아이스 근처에 성애 물방울 맺힘	
측정 장비의 문제	저울 on 상태 유지 X	저울이 꺼진다.	저울 꺼짐 -> 신뢰도?	
관찰에 이론을 적용	질량보존의 법칙*			
관찰이라기보다는 예상	드라이아이스 승화 속도는 느려질듯함			

* Key Observations

(발췌 1. 실험 1 수행 중에서)

선일: 아 근데 무게 상으로는 변화 없을 것 같아요.

종아: 전 중학교 때 했던 기억이 있는데, 그래서 뭐 상태가 변해도 질량은 변화가 없다.

세진: 질량 보존의 법칙을 할 것 같다는 느낌은 드는데 이렇게 드라이아이스로 실험하는 건 처음 봤어요.

가. 자세하고 다각적인 관찰: 양적, 질적, 어림, 측정 장비, 이론, 예상 등을 모두 아우르는 관찰

연구참여자들은 연구진의 요청에 따라 실험 과정에서 관찰한 사항들을 모두 기록했다(Table 3). 연구참여자들은 무게의 변화, 부피 변화, 기타 관찰 사항을 놓치지 않고 포착하였으며, 양적 혹은 질적으로 어림하고 측정하였다. 그들은 개별적으로 관찰하고 자신의 언어로 기록하기도 하고, 반면 측정치가 분명하지 않고 애매할 때는 상호 논의를 통해 결정하기도 하였다.

1) 양적 관찰

시범 실험이 시작되자 연구참여자들은 무게 측정에 집중했고 실험이 진행되면서 실험에 사용한 재료와 도구를 포함하여 다양한 조합의 무게를 양적으로 측정하고 메모하였다. 드라이아이스가 모두 승화되었을 때 그들은 드라이아이스의 무게, 지퍼백의 무게, 드라이아이스 + 지퍼백의 무게, 드라이아이스 + 지퍼백 + 아크릴 상자의 무게를 측정하고 기록하였으며, 각각 1 g, 5 g, 6 g, 246 g으로 기록하였다. 연구참여자들은 드라이아이스가 승화되기 전 후의 전체 혹은 다양한 조합의 무게 변화가 없다고 관찰 결과를 정리하였으며, 한 연구참여자는 아래와 같이 드라이아이스 1 g이 지퍼백 내의 공기 1 g으로 변화했다고 설명하기도 하였다(발췌 2).

(발췌 2. 실험 1 수행 중에서)

세진: 정확한데? 1 g, 1 g이 확실해. 지퍼백 내부의 드라이아이스. 케이스는 드라이아이스 1 g이었고, 지퍼백 내의 공기 무게도 1 g. 똑같네.

2) 질적 관찰과 어림을 통한 관찰

지퍼백의 부피 변화나 드라이아이스 크기의 변화는 초반에는 질적으로 관찰되었지만 이후 어림을 통해 양적으로 관찰되기도 하였다. 드라이아이스의 크기 변화에 대해서는 “드라이아이스가 작아짐”, “드라이아이스 크기가 작아진다.”라고 표현되었다. 드라이아이스가 다 없어질 때까지 실험을 진행하였기 때문에 드라이아이스가 얼마만큼 줄어들었는지에 대해서는 더 이상의 관찰이 기록되지는 않았다. 지퍼백의 부피에 대해서는 “지퍼백이 부풀어 오른다”, “지퍼백이 생각보다 많이 부퐁다.”라는 질적인 기술이 초반에 나타났으며 이후 어림을 통한 양적인 관찰이 나타났다. 처음에는 지퍼백의 규격인 22 cm×18 cm에 눈대중으로 어림한 높이 2.7 cm을 곱하여 지퍼백의 부피를 1070 cm³으로 어림하였다(발췌 3).

(발췌 3. 실험 1 수행 중에서)

종아: 이게 22 곱하기 18인데, 이 높이를 알아야 되잖아 (중략)

세진: 2 cm 정도 아닐까? (중략)

선일: 1070

세진: 단위가 어떻게 되니?

선일: 센티미터 세제곱

어림을 통해 양적으로 기술된 지퍼백의 부피는 이후 논의를 통해 보다 구체적인 수치로 어림되었다. 연구참여자들은 지퍼백의 용량이 경험적으로 알고 있는 우유팩의 부피를 서로 비교하며 지퍼백의 부피가 우유팩 1 L보다는 작고, 500 ml보다는 클 것이라고 예상했다. 세진이 경험적 부피 감각을 토대로 실험에서 사용한 지퍼백이 750 ml 우유팩보다 작다고 평가하면서 지퍼백의 크기는 최종적으로 600 ml로 어림되었다(발췌 4).²⁾

2) 지퍼백의 부피는 앞의 식 (1)을 통해 계산할 수 있는데, 온도가 28 °C인 실험실 상황에서 1.28 g의 드라이아이스가 승화되어 생기는 이산화탄소의 부피는 아래와 같이 약 720 ml이다. 결과적으로 연구참여자들은 이론값과 20 % 오차 이내로 부피를 어림한 셈이다.

$$\Delta V = \frac{22.4(1 + \frac{28}{273.15})}{44} \times 1.28 = 0.72L \quad (5)$$

(발췌 4. 실험 1 수행 중에서)

세진: 아니야, 1 L는 크지 (중략) 500 ml 우유만큼 돼?

선일: 500 ml보다 조금 더 될 것 같은데?

세진: 되게 커진다. 1 g이. (중략) 750 우유보다는 작아

선일: 750 짜리 우유도 있어요?

세진: 어, 우리 집에 배달 오는 건 750이거든 근데 이 사이즈는 못 가능해.

연구자 A: 그럼 대략 600에서 700정도?

세진: 600으로 하시죠.

3) 측정 장비, 이론, 예상 등을 관찰 사실에 기록

연구참여자들은 모두 드라이아이스나, 지퍼백 주변에 물방울이 생기는 것을 관찰사실로 기록하였다. 선일은 다른 연구참여자와 달리 “질량 보존의 법칙”과 “드라이아이스 승화 속도는 느려질듯함”을 관찰 사실로 기록하였다. 이 중 “질량 보존의 법칙”은 직접 관찰할 수 없으므로 관찰 사실이라기보다는 이론에 가까우며, “드라이아이스 승화 속도는 느려질 듯함” 역시 직접 관찰한 것이 아니라 예상에 가까지만 이 둘을 모두 관찰 사실에 포함하여 기록하였다. 또한, 실험 진행 중에 측정 장비인 “저울이 꺼짐”도 발생했는데, 연구참여자들은 이 현상도 관찰 사실에 기록하는 등 관찰사항을 빠짐없이 기록하려는 노력을 하였다.

나. 관찰의 이론의존성: 주요 관찰 사항의 선정

실험 1의 시범 과정에서 다양한 관찰 사항을 기록한 후, 연구참여자들은 활동지의 2번 질문에 대한 응답으로서 다양한 관찰 사항들 중에서 중요하다고 판단한 관찰 사실들을 선정하였다(Table 3의 굵은 글씨). 연구참여자가 세 명 모두 “저울의 눈금이 변하지 않은 것”을 주요 관찰 사실로 선정하였다. 주요 관찰 사항을 여러 개 선정할 수 있도록 허용하였기 때문에, 그 외에도 지퍼백+드라이아이스가 6 g인 것(종아), 지퍼백의 부피 증가(세진)나 드라이아이스의 크기 감소(종아), 질량 보존의 법칙(선일)도 주요 관찰 사실로 선정되었다. 주요 관찰 사항을 선정한 기준에 대해, 선일은 실험 1에서 어떤 것을 관찰해야 하는지 명확했으며, 일반적으로 과학 실험에서 ‘관찰해야 하는 것’이 특정되어 있다고 보았다(발췌 5).

(발췌 5. 실험 1 수행 후 논의에서)

선일: 관찰을 우리가 수업할 때도 뭐가 변하는지 잘 보세요. 하잖아요. 그렇지만 그때는 볼 것들이 경해져 있잖아요.

연구참여자들은 주요 관찰 사실을 선택하는 기준으로 질량 보존의 법칙을 지지하는가를 검토하였다. “지퍼백 주변의 물방울 생성”의 관찰 사항에 대해서, 종이는 초기에 주요 관찰 사실로 선정하였다. 이때 종이는 물방울을 액화 이산화탄소라고 생각하였기 때문에, 질량 보존의 법칙을 지지하는 증거라고 보았다. 하지만, 세진이 ‘수증기가 응축해서 물이 된 것’이라고 설명해주자, 종이는 이를 수용하면서 물방울이 질량 보존의 법칙을 지지하는 증거가 아니라 오히려 위협하는 증거가 될 수 있음을 깨닫고 물방울을 주요 관찰 사실에서 제외하였다(발췌 6).

(발췌 6. 실험 1 수행 후 논의에서)

세진: 근데 액체가 그 액체가 아니잖아. 드라이아이스에 대한 게 아니라 주변에 온도가 떨어지니까 주변 수증기가 응축해서 물이 된 거지. 드라이아이스 자체는 아니야.

종아: 근데 왜 질량 변화가 안됐지? (중략) 아 이게 더 혼란스러울 수도 있겠다.

다. 주요하지 않은 관찰들: 관찰 이론을 지지하지 않는 관찰 사실들의 무시

연구참여자들은 실험 1에서 다양한 관찰사실을 비교적 자세히 기록하고 어렵하였을 뿐 아니라, 그중에서 이론과 관련 있는 것을 주요 관찰 사실로 선정하여 이론과 주요 관찰 사실 간의 정합성을 확보하는데 큰 어려움을 겪지 않았다. 반면 주요 관찰 사항으로 선정하지 않은 관찰 사항에 대해서는 실험에서 중요하지 않다고 판단하거나 무시되는 경향이 있었다.

Table 3에 제시된 것처럼, 연구참여자들은 “무게”를 실험의 주요 관찰 사항으로 선정하였다. “크기”는 주요 관찰 사항으로 선정되지는 않았지만 “무게”와 정합적으로 연결되는 관찰 사항에 해당되므로 특별한 설명이 필요하지 않은 채 명시적으로 선정되지는 않았지만 무시되지는 않았다. 그러나 “지퍼백 주변의 물방울”이나 “저울이 꺼짐”은 “질량 보존의 법칙”을 위협할 있는 주요 요인이 될 수 있기 때문에 예외 사항으로 처리하였다. 연구참여자들은 처음에는 물방울을 무시하는데, 물방울이 작기 때문에 무게의 변화에 큰 영향을 주지 않았을 것이라고 주장하였다(발췌 7).

(발췌 7. 실험 1 수행 후 논의에서)

종아: 근데(물방울이 생겼는데) 왜 질량 변화가 안됐지?

세진: 부피가 워낙 작으니까 안 된 거 아닐까? 그리고 지금 다시 잴 때는 없었잖아.

종아: 맞아요.

이후에는 “물방울”을 실험 장치에서 발생한 오차로 바라보고 어떻게 극복할 수 있는지에 대한 논의가 전개되었다. 종아와 세진은 아크릴 상자가 밀봉되었다면 외부에서 유입되는 수증기가 없기 때문에 물방울이 생기지 않았을 것이라고 여겼고, “밀봉”하여 “공기를 컨트롤” 하면 진짜 “미세한 차이”도 나지 않을 것이라고 주장했다. 이는 연구참여자들이 질량 보존의 법칙의 관점에서 실험 1을 바라보며 질량 보존의 법칙을 지지하지 않는 관찰 사실들을 어떻게 처리하는지를 보여준다(발췌 8).

(발췌 8. 실험 1 수행 후 논의에서)

종아: 그럼 약간 무게가 변할 수 있는 거 아니에요?

세진: 물이 많이 들러붙으면? 그럴 수도 있겠다. 애가 밀봉된 게 아니니까 공기는 컨트롤이 되지 않았어. 그럼 이제 지퍼내부만.. (중략)

선일: 진짜 미세한 차이도 없으려면, 애도 밀봉이 확실해야 할 것 같아요. 이게 자꾸 곁에 습기 물이 생기는데, 바깥 공기가 들어가면 또 생기고 또 생기고 그러니까

마찬가지로, “저울의 꺼짐”도 관찰 사실로 기록되었지만 주요 관찰 사실로 기록되지는 않았다. 연구참여자들은 저울이 눈금이 오랫동안 변하지 않으면 자동으로 전원이 차단되는 것을 인식하였지만, 다시

영점을 맞춰 실험을 진행하여도 큰 문제가 없을 것으로 생각하였다(발췌 9).

(발췌 9. 실험 1 수행 후 논의에서)
 종아: 이 상태에서 변화가 생겼으면 변화가 생기잖아요.
 세진: 근데 아까 전에 끄기 직전에, 무게가 같았으니까... 응, 괜찮지 않을까? (중략)
 선일: 다시 영점 맞춰야지

연구참여자들은 “저울이 꺼짐” 현상을 “질량보존의 법칙”을 재현하는 관찰의 신뢰도를 떨어뜨리는 요인이라고 인식하였다. 즉, 관찰의 신뢰도를 확보하기 위해 저울이 꺼지지 않도록 통제해야 할 상황으로 간주하였다(발췌 10).

(발췌 10. 실험 1 수행 후 논의에서)
 세진: 어 또 꺼졌다 (중략) 신뢰도가 떨어져요. (중략) 저울이 꺼지는 것은 관찰의 신뢰도를 떨어뜨린다, 이정도 인거고

이와 같이 ‘지퍼백 주변의 물방울’과 ‘저울이 꺼짐’의 현상은 분명하게 관찰되었지만 연구참여자들은 “질량 보존의 법칙”을 고수하기 위해 실험 장치로 인해 나타난 단순한 오차와 통제할 수 있는 실험 조건으로 처리하여 실험 장치를 개선해야 한다고 여겼다.

2. 위기의 국면

실험 2는 초기에 안정적 탐구 과정을 보여주었지만, 위기에 봉착하게 되었다. 실험 2는 전자저울을 제외하고 실험 1과 동일한 재료와 장치로 세팅되었으나, 시작하기 전에 연구참여자들은 아크릴 상자를 없애고 실험을 해도 될 것 같다고 제안했다. 연구진은 그들의 요청에 따라 아크릴 상자 없이 실험 2를 진행하였다(발췌 11). 대신, 부피가 점점 커지는 지퍼백을 저울 위에 안정적으로 놓기 위해 테두리가 있는 살레를 저울 위에 올려놓고 측정 전자저울을 영점 조절하였다.

(발췌 11. 실험 2 수행 중에서)
 선일: 이 상자 없이. (중략) 만약에 이게 터질까봐 안전을 위해서라도 할 수는 있었지만 굳이 (아크릴 상자) 막 필요할 것 같다는 생각은 안 났어요.

실험에는 1.28 g의 드라이아이스가 사용되었으며, 실험은 드라이아이스가 완전히 사라질 때까지 약 50분간 진행되었다. 실험 2에서 지퍼백과 드라이아이스 무게의 합은 처음에 7.05 g으로 측정되었으며 최종적으로 6.23 g까지 줄어들었다. 연구참여자들이 측정한 무게의 감소량은 0.82 g이었다.³⁾

연구참여자들은 여전히 질량 보존의 법칙의 이론을 유지한 채로

실험 2를 접하였다. 따라서 저울의 눈금이 변하지 않을 것으로 예상하고 관찰을 시작하였다. 연구참여자들은 드라이아이스가 들어있는 지퍼백의 초기 무게를 측정하는데 이 무게는 아래와 같이 7.05 g에서 7.02 g, 7.03 g, 7.01 g을 거쳐 7.02 g으로 감소하였다(발췌 12).

(발췌 12. 실험 2 수행 중에서)
 세진: 7.05
 선일: 7.02? (중략)
 종아: 다시 7.03
 세진: 오케이
 종아: 그럼 7.
 선일: 7.01?
 종아: 어 다시 7.02로 됐어요.

연구참여자들은 0.03 g의 무게 감소량을 오차로 해석하였다. 이는 연구참여자들이 질량 보존의 법칙에 근거하여 실험을 해석하고 있음을 보여준다. 초반에 일어난 작고 비지속적인 무게 감소는 질량 보존의 법칙의 재검토나 교체를 고려할 만큼 심각하게 받아들여진 정보가 아니었음을 의미한다. 연구참여자들은 관찰 결과를 “대충 맞는 것”으로 판단하였다(발췌 13).

(발췌 13. 실험 2 수행 중에서)
 종아: 대충
 선일: 대충 맞긴 한데.
 종아: 맞긴 하다
 세진: 맘에 안 들어? 다시 해?
 종아: 0.03의 오차가 생겼어요.

따라서 7.05 g에서 7.02 g의 값 중 연구참여자들은 7.02 g을 드라이아이스가 들어있는 지퍼백의 초기 무게로 합의하고 관찰결과에 기록하였다(발췌 14).

(발췌 14. 실험 2 수행 중에서)
 세진: 7.02로 할까?
 종아: 어 다시 7.02로 됐어요.
 선일: 됐어? 그럼 맞아

연구참여자들은 0.03 g의 오차의 원인에 대해 설명하였으며 질량 보존의 법칙은 아직 견고히 유지되고 있었다. 저울의 문제, 공기를 다 빼지 않은 것 등이 오차의 원인으로 언급되었다(발췌 15).

(발췌 15. 실험 2 수행 중에서)
 선일: 그거는 공기(를 다 빼지 않았기) 때문에...
 세진: 공기 때문에 그런 거야? (중략)
 종아: 아니 저울의 문제인 것 같아

연구참여자들은 무게의 변화를 오차로 처리하고 질량보존의 법칙을 고수하였지만, 무게가 지속적으로 감소하는 바람에 서서히 위기에 봉착하게 되었다. 연구참여자들은 혼란에 빠져 관찰 결과를 의심하기도 하고 이론을 의심하기도 하였다. 종아는 이론을 의심하기 시작하였으며, 세진은 무게 감소의 원인으로 지퍼백 내의 공기를 다 빼지 않은 것을 의심하기 시작하였다. 하지만 선일은 무게가 아직 줄어든

3) 실험실 기압은 약 0.99기압이었으며, 온도는 28 ℃이었다. 이와 같은 조건에서 1.28 g의 드라이아이스가 승화할 때 나타나는 무게의 변화 ΔW 는 아래 식 (6)와 같이 약 -0.83 g으로 계산된다. 실험 2에서 측정한 값은 이론값과 1.2 % 정도의 차이를 보였다.

$$\Delta W = -\frac{1.293 \times 0.99}{1 + 0.00367 \times 28} \times \frac{22.4(1 + \frac{28}{273.15})}{44} = -0.83(\text{g}) \quad (6)$$

다고 할 정도는 아니라며 질량 보존의 법칙을 여전히 지지하였다(발췌 16). 일부의 연구참여자에게 질량 보존의 법칙이 의심받기는 하였지만 여전히 일부 연구참여자에게 질량 보존의 법칙은 견고한 이론이었으며, 이때까지도 연구참여자들에게 무게의 감소량은 오차로 관찰되고 있었다.

(발췌 16. 실험 2 수행 중에서)

종아: 어? 점점 줄어
세진: 아까 바람 빼고 넣었는데
선일: 아직은 잘 모르겠어요

전자저울의 눈금 변화를 무게의 변화라고 인정하기 시작한 것은 실험을 시작한 뒤 1-2분 정도 지난 뒤부터였다. 작지만 지속적인 변화는 연구참여자들이 하여금 더 이상 오차로 여길 수 없게 했으며 무게의 변화를 확신하게 했다. 이전에 “오차”로 해석되었던 0.03 g의 감소량은 이제 “그냥 줄어드는 것”으로 해석되며, 따라서 지퍼백의 초기 질량은 이전에 합의되었던 7.02 g에서 7.05 g으로 수정되었다. (발췌 17).

(발췌 17. 실험 2 수행 중에서)

선일: 어 점점 줄어. 0.2, 0.02씩
세진: 당황스러운데? (중략)
세진: 근데 진짜 드라마틱하게 줄어 들고 있어요.
선일: 조금씩 줄잖아
세진: 이게 드라마틱이네.
종아: 응? 신기하다
세진: 이게 7.05부터 시작한 거지?
선일: 이정도면 오차가 아니라 그냥 줄어드는 건데?

3. 유동적 탐구(fluid enquiry)의 국면

연구참여자들은 무게 감소를 인정하게 되면서 더 이상 질량 보존의 법칙을 고수할 수 없게 되었다. 이때 실험 상황은 질량보존의 법칙을 대체하여 무게 감소를 설명할 수 있는 새로운 설명체계를 찾는 유동적 탐구의 국면으로 전환되었다. 유동적 탐구는 기존의 이론이나 지식 체계와 맞지 않는 관찰 자료를 더 이상 무시하지 못하게 되면 새로운 지식 체계를 찾는 과정을 의미한다(Schwab, 1962). 유동적 탐구의 국면에서는 새로운 지식 체계를 찾고 그 체계의 적절성과 가능성을 검증하는 과정이 수행되기 때문에 불안정한 상태이며 실재가 빈번하게 발생한다.

연구참여자들은 실험 2에서 관찰한 “무게 변화”를 기정사실화하면서, “질량보존의 법칙”을 재현한 실험이라고 믿었던 실험 1과 실험 2에서 “무엇이 일어난 것인지”에 대한 질문을 암묵적으로 재개하였다. 이 질문에 대한 여러 가지 밀천(resources)을 동원해서 새로운 가설과 모형을 제안하고, 이를 검증할 실험을 요청하였다. 이때, 선일은 새로운 가설인 “열린계 닫힌계”를 제안하면서 추가실험 1을 요청하였고, 이에 대해 종아는 선일의 의견에 동조하지 않으면서 추가실험 2를 요청하였고, 이에 대해 다시 선일은 추가실험 3을 요청하였다.

가. 추가실험 1. 아크릴 상자 재설치한 후 무게 측정

추가실험 1은 실험 2가 시작되고 연구참여자들이 “무게 감소”를 확인하면서 선일이 새로운 가설인 “열린계 닫힌계”를 제안하면서 요청된 것이다. 선일은 실험 2에서 살레를 사용했기 때문에 무게 감소가 일어났다고 추론하면서, 실험 1과 동일한 조건으로 실험해보자고 제안하였다. 따라서 추가실험 1에서는 실험실 상황에서 확보된 저가형 0.01 g 단위 전자저울이 사용되었고(Figure 1) 실험 1에서 사용했던 아크릴상자를 설치하여 수행되었다. 즉, 추가실험 1에서 전자저울과 아크릴 상자를 제외한 다른 조건은 실험 2과 같도록 최대한 통제되었다. 추가실험 1에서 최종적으로 지퍼백의 무게는 7.35 g에서 7.45 g으로 소폭 증가하였다. 연구참여자들은 이 0.07 g의 증가를 “중요하고 의미 있는 수치”로 간주하지 않고 “오차”로 판단하였으며, 최종적으로 “무게는 변하지 않았다”고 주장하였다. 실험 2와 추가실험 1의 결과의 차이는 아크릴 상자의 유무가 주요 변인일 것이라는 연구참여자들의 예상을 지지하는 것처럼 보였다.4)

선일은 일차적으로 실험 1과 실험 2의 차이에 집중하여 “열린계 닫힌계” 이론을 제안하였으며 이 이론 하에서 추가 실험 1과 2가 진행되었다. 앞에서 논한 것과 같이 추가실험 1과 2에서는 시간에 따른 전자저울의 영점 상승과 부력에 의한 무게 감소에 의해 결과적으로 저울의 눈금의 변화가 크게 나타나지는 않았었다. 이러한 복잡계적 실험의 성격은 명백한 하나의 이론 하에서 실험이 진행되지 않게 하는데, 연구참여자들은 각자 다른 자신의 이론을 가지고 실험을 바라보았다.

그러나 “열린계 닫힌계”를 제안한 선일이 추가실험 1의 결과에 만족한 반면, 종아는 실험 2와 추가실험 1의 무게 차이에 대해 의심을 품는다. 실험 1에서 “질량보존의 법칙”이 강력한 이론으로 작용한 것과 달리, 추가실험 1에서 “열린계 닫힌계” 이론은 강력하게 작용하지는 않았다. 선일과 세진은 “열린계 닫힌계”이론을 지지하지만 종아는 “열린계 닫힌계” 이론을 지지하지는 않았다(발췌 18).

(발췌 18. 추가실험 1 수행 후 논의에서)

선일: 같은 계 안에 있는데, 재는 공기(이산화탄소)가 떠버리면 같은 계 무게가 안 재져서 줄어드는 것 아닐까요? (중략)
세진: 아 이제 이해했어. 너가 설명한 게 이게 맞는지 들어봐 잠깐만 헛갈리니까 이걸 정리를 한 번 하고 할게. 여기 있는 애가 무게를 잴 때 이 박스 안에서만 무게가 재어진다는 거야? 그래서 이게 공기가 들락날락하더라도 박스 내부의 공기는 일정할 테니까? (중략) 오케이. 무슨 말인지 알겠어?
종아: 아니요 (중략) 근데 이 상태나 이 상태나 뭐가 다른 거지?

드라이아이스가 들어있는 지퍼백의 처음 무게는 7.35 g이었으며 실험의 초반에 0.1 g만큼 증가했으며, 감소와 증가를 반복하면서 최종

4) 추가실험 1에서 지퍼백의 무게가 실험 2에 비해 유의미하게 줄어들지 않았던 것은 사실 저울의 부정확함에서 기인하였다. 보통 어떤 물체의 무게를 재는 것은 아주 짧은 시간 내에 이뤄지기 때문에 보통의 실험상황에서는 잘 드러나지 않지만, 안정성이 떨어지는 저가형 전자저울은 시간이 지남에 따라 영점이 달라지기도 한다. 실험이 모두 끝난 후, 연구자는 별도의 확인실험 즉, 저가형 전자저울에 아크릴 상자를 올려둔 뒤 50분 동안 저울의 눈금의 변화를 관찰한 결과 영점이 0.83 g만큼 증가한 것을 확인할 수 있었다. 결과적으로 추가실험 1에서 무게의 변화가 나타나지 않았던 것은 전자저울의 영점의 증가량과 부력에 의한 무게 감소량이 서로 상쇄되어 겉으로 그 변화가 드러나지 않은 것이다.

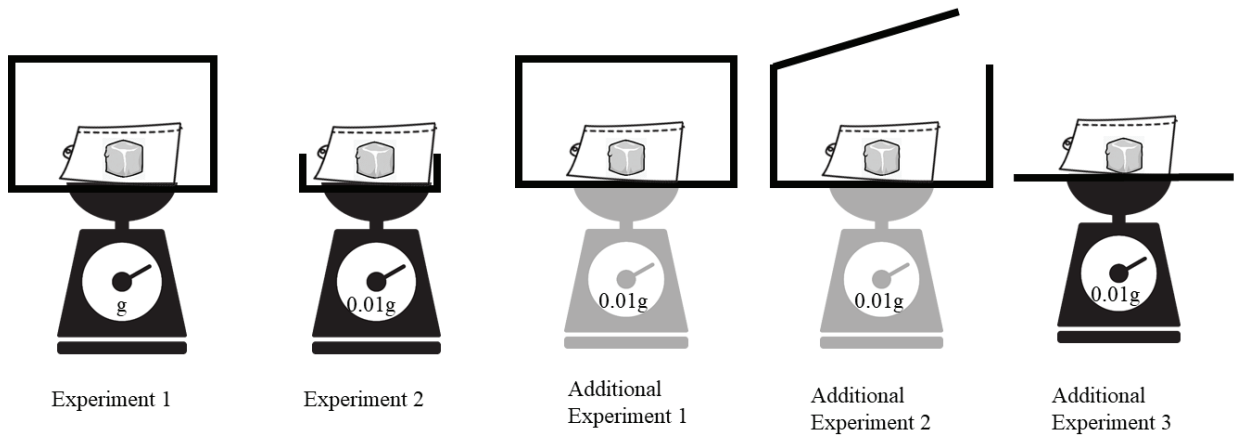


Figure 1. Practice of Activities and Experiments(Low Cost Electronic Scale represented by Grey Color)

적으로 7.45 g로 0.1 g만큼 증가한다. “열린계 닫힌계” 이론을 지지하지 않는 종이는 이 0.1 g의 변화를 증가량이라고 관찰한다. 하지만 “열린계 닫힌계” 이론을 지지하는 선일은 무게가 줄어들지 않는다고 관찰하며 이를 “열린계 닫힌계” 이론을 지지하는 근거로 사용하였다. 무게의 변화폭도 크지 않았으며 그 변화가 지속적이지도 않았으므로 이 소폭의 증가량은 “열린계 닫힌계” 이론을 가진 선일이 보았을 때 단지 오차에 불과하며 따라서 추가실험 1을 통해 “열린계 닫힌계” 이론이 정확히 증명이 되었다고 생각하였다(발췌 19).

(발췌 19. 추가실험 1 수행 후 논의에서)

종아: 그럼 애도 떨어져야 맞는 거 아니야? (중략) 앤 늘어나

선일: 0.1 g? 그러니까 줄어들지는 없네.

--중략--

선일: 저는 근데 이게 늘어나는 거는 크게 유의미한 것 같지는 않는데 (중략) 근데 질량 보존 됐다는 것만 보고 싶으면 애(추가실험 1에서 저울의 눈금)가 변화가 없다는 걸로 다 증명이 되는 거 아니에요?

하지만 “열린계 닫힌계” 이론을 받아들이지 않았던 종이는 추가실험 1의 결과를 보고 “열린계 닫힌계” 이론을 증명하는데 충분하다고 여기지 않았다. 종이는 지속적으로 새로운 의문점을 만들어냈으며, 그 중 하나는 추가실험 1에서 아크릴상자의 완전한 밀폐 여부에 대한 의심이었다(발췌 20).

(발췌 20. 추가실험 1 수행 후 논의에서)

종아: 근데 이게 밀봉이 안 되도 그런 건가? 효과가 있냐? 근데 닫힌계가 되려면 아예 상호작용이 안 되어 하는데? (중략)

세진: 응 그러니까 1번 안이 지퍼백 내주고 2번이 플라스틱 통 안이고 3번이 바깥이라면 1번 3번과 상호작용이 좀 덜하더라도

종아: 2, 3번 자체가 나뉘지 않은 거 아니에요? 애는?

아크릴 상자의 완전한 밀폐 여부는 종아에게는 “열린계 닫힌계” 이론을 위협할 수 있는 주요 관찰 사실이었지만 “열린계 닫힌계” 이론을 지지하는 선일과 세진에게 아크릴 상자의 완전한 밀폐 여부는 주요 관찰 사실이 아니었다. 아크릴 상자의 완전한 밀폐여부는 다음과 같이 선일과 세진에 의해 “완전하게는 아니지만 그래도 나뉘져 있기는 함”이라는 보조 가설에 의해 간단히 제외되었다. 그러자 종이는 아크릴 통의 뚜껑을 열어 열린계를 만들면 어떻게 될지 문제제기하였다.

이때, “열린계 닫힌계” 이론에 따르면 무게가 줄어들어야 할 것이라는 가설 검증을 제안한 셈이다(발췌 21).

(발췌 21. 추가실험 1 수행 후 논의에서)

선일: 그러니까 완전하게는 아닌데 그래도 나뉘져 있기는 하잖아요. 어느 정도는

세진: 완벽하지는 않아도 일단은...

--중략--

종아: 근데 애 뚜껑을 열었어, 그럼 어떻게 돼?

세진: 열었다 닫아볼까? (중략) 너(선일)의 가설이 맞는 거라면, 열었을 때 무게가 줄어야 되는 거네.

나. 추가실험 2. 아크릴 상자 뚜껑 열고 무게 측정

선일의 주장에 동의하지 못하는 종이는 새로운 추가실험 2를 요청하였다. 추가실험 2는 추가실험 1의 장치에서 아크릴 상자의 뚜껑만 열어놓고 무게의 변화를 관찰하는 것이었다. 이때 가설은 “(선일의 주장대로) 아크릴상자가 닫힌계라 무게가 줄어들지 않는 것이라면, 아크릴 상자의 뚜껑을 연 추가실험 2에서는 무게가 줄어들 것”이다. 이 가설을 검증하기 위한 추가실험 2에서 연구참여자들은 아크릴 상자의 뚜껑을 열어도 무게가 변하지 않는 것을 확인하였다(발췌 22).

(발췌 22. 추가실험 2 수행 중에서)

종아: 어 줄어든다.

세진: 기다려봐, 기다려봐.

선일: 아니야, 아니야. (중략) 늘어나지 계속?

종아: 재는 급격하게 줄어드는데, 애는...

선일: 7까지 가면, 어, 뭐야? 변화가 없는 건가?

종이는 “무게 변화 없음”을 증거로 “닫힌계와 열린계” 주장에 반박하였다. 하지만 선일과 세진은 여전히 “열린계 닫힌계”의 이론을 지지하고 있던 터라 추가실험 2의 결과를 중요하게 취급하지 않았다. 선일과 세진은 아크릴 상자의 뚜껑은 완전히 열린 상태로 볼 수 없다고 주장하며 이번에도 추가실험 2의 결과는 주요 관찰 사실로 간주하지 않았다(발췌 23).

(발췌 23. 추가실험 2 수행 후 논의에서)

선일: 근데 이거는 열리긴 열린 건데 완전히 열린 거라고 보기는 애매해. 감이 안 와. (중략) 애매하잖아 되게, 열리긴 열린 건데. 완전히 열린 게 아니니까.
세진: 완전히 열린 게 아니니까

선일은 두 차례나 반박되어도 “열린계 닫힌계” 이론을 견고하게 지지하지만 종아의 문제제기로 인하여 합의에 이르지 못하자 새로운 가설을 제안하였다. 선일은 확실한 열린계의 실험 장치를 만드는 것이 필요하다고 여겨, 저울 위에 놓아둔 그릇의 바닥 면적에 해당하는 수직 위 부분의 무게만을 측정할 수 있도록 “바닥 면적”이론을 제안하였다. “열린계 닫힌계”이론에 동의하지 않던 종아는 새로운 “바닥 면적” 이론을 그럴 듯하다고 생각했으며, 검증가능성을 열어놓았다. 선일과 세진도 “바닥 면적”이론을 그럴듯하다고 임시적인 이론으로 받아들이지만, 추가실험 2에서 반증된 “닫힌계와 열린계”이론을 포기하지 않았으며 여전히 견고한 이론으로 남겨두었다. 결과적으로 “바닥 면적” 이론은 연구참여자 모두 그럴듯하다고 생각하긴 하였지만 누구에게도 견고하게 자리 잡진 못하였으며 임시적인 이론으로 작용하였다(발췌 24).

(발췌 24. 추가실험 2 수행 후 논의에서)

종아: 지금 너는 이만큼까지(살레 면적의 윗부분)의 무게만 재어지고 있다고 생각하는 건가?
선일: 뭐 꼭 그런 건 아니어도, 무게를 재려면 거기를 다 커버해 줘야하나라는 생각도 들어요.
종아: 그계(바닥 면적) 난 더 신빙성이 갈 것 같아.
세진: 계보다는?
종아: 네네
세진: 근데 계(닫힌계와 열린계)도 신빙성이 가.
선일: 맞아 계(닫힌계와 열린계)도 괜찮아.

다. 추가실험 3. 바닥 면적을 넓히고 무게 측정

“바닥 면적” 이론의 검증 방법은 선일이 제안하였다. 새로운 주장을 검증하기 위해 연구참여자들은 추가실험 3을 진행한다. 추가실험 3은 승화하여 7.05 g에서 6.23 g으로 무게가 줄어든 지퍼백을 바닥이 넓은 판 위에 올려 다시 측정하여 무게가 변하는지 확인해보는 것이었다. 연구참여자들은 실험 2에서 무게가 6.23 g으로 줄어든 지퍼백의 무게를 바닥이 넓은 판 위에서 다시 측정할 때, “바닥 이론”에 따르면 무게가 증가할 것으로 예상하였다(발췌 25).

(발췌 25. 추가실험 3 수행 중에서)

선일: 그러면 이 상태에서 이거 (넓은) 판 놓고 하면 무게가 달라져야 하는 거 아니에요? (중략) 아니 그러니까 이 상태에서 이거 0이잖아요. 제로 맞추면 그러니까 이게 0.6 몇보다 더 크게 나와야 한다는 거예요.
세진: 아 그럴 수 있겠군.
종아: 해볼까요?

추가실험 3에서 부채 위에 올려두고 지퍼백의 무게를 잰 결과 6.23 g으로 질량은 처음 살레위에서 잰 것과 정확히 일치했다. 이 실험 결과는 “바닥 면적”이론의 반증 사례에 해당한다. 앞서 질량 보존의

법칙이나 열린계 닫힌계 이론에서, 반증 사례에서 이론을 보호하기 위해 선일과 세진이 노력하였던 것과 달리 “바닥 면적”이론은 아무도 보호하지 않았다. 누구에게도 견고하게 작용하지 않았던 임시적 이론인 “바닥 면적” 가설은 한 번의 반증 사례를 통해 바로 폐기되었다(발췌 26).

(발췌 26. 추가실험 3 수행 후 논의에서)

선일: 6.23이 맞잖아요. 된 거잖아요.
종아: 네 똑같아요.
선일: 네. 그럼 바닥 판은 의미 없다는 거잖아요.
종아: 의미 없다는 거지.

4. 탐구 활동에서 드러난 인식론적 논제

실험1, 2와 추가실험 1, 2, 3을 모두 마친 뒤 연구참여자들은 반성적 논의 과정에 참여하였다. 반성적 논의 과정에서 연구참여자들은 실험 중에 드러난 자신의 생각을 되짚어보며 자유롭게 인식론적 논제를 이끌어냈다. 총 세 가지의 인식론적 논제가 도출되었으며, 인식론적 논제 1은 실험 1과 실험 2를 검토하는 과정에서, 인식론적 논제 2는 실험 2의 위기국면을 논의하는 과정에서, 인식론적 논제 3은 실험 1과 추가실험들을 검토하는 과정에서 도출되었다. 연구참여자들의 논의는 인식론적 논제의 하위 요소 중 ‘과학적 관찰, 사실, 가설, 모형 및 이론 본성’에 집중되었으며, ‘측정 오차가 과학적 지식의 신뢰도에 미치는 영향’에 대한 논의도 일부 나타났다.

가. 인식론적 논제 1. 관찰은 이론 의존적이다.

연구참여자들은 실험 1에서 “질량 보존의 법칙”에 근거하여 주요 관찰 사실을 선정하였다. 이러한 “이론 의존적 관찰”은 실험 1과 실험 2의 초반까지 유지되었다. 연구참여자들은 모두 관찰로부터 주장이 나온다고 여기지 않았다. 반대로, 관찰로부터 주장으로 가는 것이 아니고 관찰자가 어떤 이론을 가지고 있는가에 따라서 관찰 결과가 달라진다고 여겼다. 발췌 27에서 볼 수 있듯이, 세진은 주요 관찰 사실의 도출과정에 대해 “관찰하는 것들을 질량 보존으로 맞추려고, 원래 가설을 지지하게 된 여러 가지 것들을 만들어”냈다고 설명하였다(발췌 27).

(발췌 27: 반성적 논의 과정에서)

세진: 이건 질량 보존의 법칙이라고 확답을 했던 것 같아요. 그래서 그거 이외에는 생각하지도 않았고, 그리고 질량이라고 생각하고 보니까 또 결과가 그거랑 맞아 떨어졌어요. 맞아 떨어졌기 때문이고 (중략) 질량보존이라고 생각하니까 내가 관찰하는 것들을 질량 보존으로 맞추려고 관찰하는 게 많았던 것 같아요. (중략) 어지간하면 자기의 원래 가설을 지지하게 된 여러 가지 저런 것들을 만들어 내거든요.

연구참여자들은 실험 초기에 자신의 관찰이 이론 의존적이었다는 것을 인식하고 명시적으로 표현하였다. 선일은 배경지식이나 인지, 종아는 배경지식과 경험, 세진은 선언적인 판단, 생각 등이 자신의 관찰에 영향을 주었다고 설명하였다(발췌 28).

(발췌 28: 반성적 논의 과정에서)

선일: 사람의 차이일 수도 있고, 아니면 배경지식의 차이거나? 저희도 똑같은 사람이었는데 그 실험을 보고 그때 본 현상에 차이를 느낀 거 같아요. 그 사이에 저희 배경지식이 달라진 건 아닌데 그래서 그때 우리가 인지한 우리가 어떻게 인지했는지에 따라 설명이 다르게 나가는 것 같아요.

종아: 저는 관찰하는 사람의 배경지식에 따라서 설명이 다 다르게 나올 수 있다고 봐요. (중략) 그래서 그 관찰하는 사람이 어떤 생각을 하고 있냐. 아니면 어떤 경험을 했느냐에 따라 똑같은 것을 관찰해도 다른 설명을 붙일 수 있을 것 같아요.

세진: 아 이걸 보면서 확실히 느낀 게, 아 내가 보고 싶은 거 보는구나. 이게 되게 뚜렷하게 느껴졌어요. 그래서 선언적인 판단, 생각, 알고 있는 것, 개념적으로 알고 있는 것, 이런 게 실험에 되게 많은 영향을 주겠구나.

나. 인식론적 논제 2. 관찰 사항이 더 이상 이론에 의존할 수 없는 위기 국면에 봉착하면, 관찰(증거)과 이론 조정이 진행된다.

안정된 탐구의 상황에서 연구참여자들은 자신의 견고한 이론에 근거하여 주요 관찰 사실을 설명하거나 선정하였다. 실험 1에서 관찰해야 할 대상은 명확해졌으며 연구참여자들의 이견도 나타나지 않았다. 주요 관찰 사실 이외에 견고한 이론을 위협할 수 있는 관찰 사실들은 오차나 신뢰도 하락 등의 원인으로 해석하였으며 극복해야 할 대상으로 바라보았다. 하지만 이렇게 견고한 이론도 계속 유지되지는 않았다. 실험 2에서 무게 변화가 적지만 지속적으로 변화하였고 연구참여자들은 확신했던 “질량보존의 법칙”을 더 이상 주장할 수 없는 위기 상황에 봉착하였다(발췌 29).

(발췌 29. 실험 2 수행 중에서)

선일: 점점 줄어드는데?

종아: 응?

세진: 아까(실험 1에서) 우리 이거 헛수고 한 거네.

종아: 뭐야, 왜 줄지?

세진: 이거 뭔가 있어

종아: 이거 뭔가가 있는 거 같은데?

---중략---

세진: 당황스러운데?

종아: 잠깐만

위기 국면에 대해, 연구참여자들은 어떤 이론에 근거하여 관찰을 해야 할지 혼란을 겪었다고 반추하였다(발췌 30).

(발췌 30: 반성론적 논의 중에서)

선일: 네 첫 번째는 명확했는데, 두 번째는 뭘 봐야 될지 모르겠는 거예요.

연구 참여자들은 이러한 위기의 국면이 실제 교실 현장에서 충분히 나타날 수 있는 일이라고 말하였으며, 일부 연구참여자는 실험 2의 위기의 국면을 망한 실험으로 평가하기도 하였다(발췌 31).

(발췌 31: 반성론적 논의 중에서)

세진: 예비실험 안하고 실험세팅으로 이렇게 했을 때, 이거 망하면 어떤 얘기를 하지 무슨 얘기를 해야 되지? 이렇게 망했을 때 무슨 얘기

를 해야 되지? 그럼 교수자는 어떻게 해야 할까라는 생각이 들었어요. 교수자는 뭐라고 설명을 하고 대부분의 경우에 실험이 안 나왔을 경우에는 그런 얘기가 있잖아요. 도구 탓하고 과정 탓하고 나네가 뭘 잘못했겠지. 과연 이걸 내가 이렇게 해도 안 나오는데, 그게 맞을까? 하고

연구참여자의 의사를 최대한 존중하여 실제 교실현장과 같은 상황에서 진행된 이 연구에서 실험의 복잡계적 특징은 연구참여자를 이론이 무엇인지 쉽게 파악할 수 없는 상황으로 이끌었다. 상황에 따라 연구참여자에게 견고하게 자리 잡은 이론은 반증 사례를 주요 관찰 사실에서 제외하는데 사용되기도 하며, 덜 견고한 이론은 바로 폐기되기도 한다. 이러한 이론과 관찰 사실의 조정 국면은 실험 2에 추가 실험 1, 2, 3을 뒤이어 진행되도록 하였으며 기존의 이론을 검토하고 새로운 이론을 제시하게 하였다.

다. 인식론적 논제 3. 관찰과 이론의 관계에 따라 안정적 탐구 혹은 유동적 탐구가 수행된다.

연구참여자들은 안정된 탐구인 실험 1의 목적을 “배운 것을 검증하는 것”, “법칙을 알고 있는 상태에서 확인 하는 것”, “가설의 검증이나 이론을 확인하는 것” 등으로 설명하였다. 이와 같이 실험 1에서 강하게 작용한 “관찰의 이론 의존성”은 연구참여자들이 실험 1에 확인 실험의 성격을 부과하도록 하였다(발췌 32).

(발췌 32: 반성적 논의 과정에서)

선일: 예를 들어 질량이 보존된다는 걸 했을 때, 그걸 검증하기 위해서 이걸 본거고

종아: 그 질량보존의 법칙이라는 것을 알고 있는 상태에서 첫 번째 실험을 했을 때는 아 내가 생각한 게 맞구나 그런 확인용

세진: 저도 이게 되게 중요하다고 생각한 게, 실험을 언제 하느냐가 되게 중요한 것이라고 생각했거든요? 그리고 학교에서 하는 실험들 대부분은 가설의 검증이나 이론의 확인이잖아요?

반면 연구참여자에게 의해 유동적 탐구로 진행된 실험 2와 추가 실험 1, 2, 3에 대해서는 “모르는 현상에 대해서 알아내기 위한 수단” 또는 “확인용이 아니라 더 알아보는 그런 실험”으로 설명하는데 즉, 실험 2의 목적을 탐구 실험이라고 설명했다(발췌 33).

(발췌 33: 반성론적 논의 중에서)

선일: 모르는 현상에 대해서 알아내기 위한 수단으로 하는 것 같아요 (중략) 예를 들면 돌연변이나 이런 걸 관찰을 하고 행동적이나 이런 걸 여러 가지를 실험하고 보면서 아 애네가 이래서 그랬구나 하는 걸 검증하는 수단으로 쓰는 것 같거든요? 증거로?

종아: 확인용이 아니라 뭘 더 알아보는? 그런 실험이라고 느껴졌어요, 저는. (중략) 몰랐던 걸 알아내는

실험 2의 상황은 더 이상 깔끔한 이론 검증의 목적이 아니고 무슨 일이 벌어지고 있는지를 이해해야 하는 복잡계 상황으로 전환되었고, 연구참여자들은 새로운 이론이나 가설을 찾아야 하는 “유동적 탐구”를 부지런히 수행하게 되었다. 이전의 이론은 적용될 수 없게 되고, 이전의 오차는 의미 있는 관찰 사항으로 해석되고, 새로운 가설을 검증하기 위한 다양한 실험 장치가 고안되고 수행되었다.

IV. 결론 및 제언

이 연구는 과학 내용에 기반한 탐구의 본성에 초점을 탐구 실험을 시범 적용하고, 실험 활동과 반성적 논의를 분석하여 교육적 함의를 도출하고자 하였다. 또한 탐구의 본성과 그 교육적 의미에 대한 탐색을 통해 탐구 실험의 새로운 교육적 지대를 구성하고자 하였다.

연구 결과는 탐구 실험의 안정적 국면, 위기 국면, 유동적 국면의 특징을 보였으며, 실험 과정에서 연구참여자들은 탐구 실험과 연관된 인식론적 논제를 반추하였다. 실험 과정의 특징을 살펴보면, 실험 1에서 연구참여자들은 실험 장치와 연구진의 시범을 보면서 이 실험이 ‘질량보존의 법칙’을 재현하기 위한 실험이라고 간파했으며, 실험은 안정적 탐구의 특징을 보여주었다. 연구참여자들은 다양한 관찰사실을 비교적 자세히 기록하고 어려웠을 뿐 아니라, 그 중에서 이론과 관련 있는 것을 주요 관찰 사실로 선정하였다. 반면 주요 관찰 사항으로 선정하지 않은 관찰 사항에 대해서는 실험에서 중요하지 않다고 판단하거나 무시하는 경향이 있었다. 실험 2의 초기에도 안정적 탐구가 나타났다. 연구자들은 무게의 변화를 오차로 처리하고 질량보존의 법칙을 고수하였다. 그러나 작지만 지속적인 변화가 발생했고 연구참여자들은 더 이상 무게 감소량을 오차로 여길 수 없는 위기에 봉착했다. 이때, 연구참여자들은 더 이상 질량 보존의 법칙을 고수할 수 없게 되었으며, 실험 상황은 질량보존의 법칙을 대체하여 무게 감소를 설명할 수 있는 새로운 설명체계를 찾는 유동적 탐구의 국면이 전개되었다. 연구참여자들은 주요 관찰 사항으로 취급하지 않았던 다양한 관찰 사항을 다시 고려하고, 여러 가지 밑천(resources)을 동원해서 새로운 가설과 모형을 제안하고, 이를 검증할 추가 실험을 요청하였다. 추가실험에는 연구참여자간 합의된 하나의 강력한 이론이 없었으며 각자의 가설에 비추어 실험을 관찰하였다. 상황에 따라 연구참여자에게 견고하게 자리 잡은 이론은 반증 사례를 주요 관찰사실에서 제외하는데 사용되기도 하며, 덜 견고한 이론은 바로 폐기되기도 하였다.

실험에 뒤이어 진행된 반성적 논의과정에서 연구 참여자들은 다음과 같은 세 가지 인식론적 논제를 이끌어 냈다. 첫째로 연구참여자들은 실험 초기에 자신의 관찰이 이론 의존적이었다는 것을 인식하고 명시적으로 표현하였다. 연구참여자들은 배경지식이나 인지, 경험, 선연적인 판단, 생각 등이 관찰에 영향을 주었다고 자신만의 언어로 설명하였다. 둘째로 연구참여자들은 관찰 사항이 더 이상 이론에 의존할 수 없는 위기 국면에 봉착하면 관찰과 이론의 조정이 진행된다고 설명하였다. 위기 국면에 대해, 연구참여자들은 어떤 이론에 근거하여 관찰을 해야 할지 혼란을 겪었다고 반추하였다. 이론과 관찰 사실의 조정 국면은 실험 2에 추가실험 1, 2, 3을 뒤이어 진행되도록 하였으며 기존의 이론을 검토하고 새로운 이론을 제시하게 하였다. 셋째로 관찰과 이론의 관계에 따라 안정적 탐구나 유동적 탐구가 수행된다고 설명하였다. 연구참여자들에게 실험 2의 상황은 깔끔한 이론 검증의 목적이 아니고 무슨 일이 벌어지고 있는지를 이해하기 위해 다양한 변인과 이론의 관계를 탐색해야 하는 복잡계 상황으로 전환되었고, 결과적으로 연구참여자들은 새로운 이론이나 가설을 찾아야 하는 “유동적 탐구”를 부지런히 수행하게 되었다.

이상의 연구 결과를 토대로 도출된 예비 교사를 위한 탐구 실험에 대한 교육적 함의는 다음과 같다. 첫째, 이 연구는 안정적 탐구에 뒤이

어 유동적 탐구가 자발적으로 진행 될 수 있는 탐구 실험의 가능성을 보여주었다. 안정적 탐구는 전체의 과학적 지식이라고 인식하도록 가르치는 것들, 간단히 말해 과학적 지식을 축적하는데 의미가 있으며, 유동적 탐구는 안정적 탐구에서 생기는 모순을 해결하며 더 유용성 있는 새로운 원리나 규칙을 만들어 낸다는 데에서 그 의미를 찾을 수 있다(Schwab, 1964). 안정적 탐구와 유동적 탐구의 구분은 쿤(Kuhn)의 과학혁명 이론에 등장하는 정상과학 및 패러다임의 변화와 여러 가지 점에서 유사하다(Song, 2006). 안정적 탐구와 유동적 탐구 중에 무엇이 더 중요한가 하는 질문은 무의미하며, 과학적 과정의 중요한 특징은 안정적 탐구와 유동적 탐구가 번갈아 가며 나타나는 것이다(Schwab, 1964). 보통의 과학 교육 현장에서는 안정적 탐구와 유동적 탐구가 분리된 경우가 많으며, 한 차시 내에 가능한 단순 탐구 활동 등을 통해 안정적 탐구를, 수 주간의 시간이 필요한 자유탐구 등을 통해 유동적 탐구를 수행하는 경향이 있다. 이 연구에서는 같은 주제를 다루면서 약간의 실험 설계의 변형(본 연구에서는 도구의 변경)을 통해 안정적 탐구에 뒤이어 자발적으로 유동적 탐구가 나타날 수 있음을 보였다. 본 연구에서는 이러한 탐구의 한 가능성을 확인하였으며, 구체적으로 다양한 주제에서 다양한 대상에게 이와 같은 방식의 탐구가 가능한 것인지에 대해서는 추가적인 연구 및 논의가 필요할 것이다.

둘째, 연구참여자들은 탐구 실험에 뒤이은 반성적 논의과정에서 자신의 경험에 기반한 인식론적 논제를 이끌어 낼 수 있음을 확인하였다. 이때의 인식론적 논제는 특정 주제에 대한 관찰과 이론을 다룬다는 점에서 범교과적인 맥락에서 다루어지는 인식론적 논제와 차별화된다. 이 연구에서 연구참여자들은 자발적으로 안정적 탐구에서 유동적 탐구로 향하는 탐구를 경험하였으며, 안정적 탐구에서 유동적 탐구로 넘어가는 위기의 국면에서 자신의 이론으로 더 이상 설명되지 않는 상황을 경험하였다. 이러한 불일치 상황(Jho, & Song 2011; Nott, & Wellington, 1998)에 뒤이은 반성적 논의에서 연구 참여자들은 자신의 경험에 기반하여 인식론적 논제를 도출하였을 뿐만 아니라 자신의 언어로 표현하고 논의하였다. 구체적으로 연구 참여자들은 관찰의 이론의존성, 관찰과 이론의 조정, 관찰과 이론의 관계에 따른 탐구의 특징 등을 인식론적 논제로 다루었으며, 자신의 경험에 기반하여 자신의 언어로 표현하고 논의하였다. 이들 논제는 과학 탐구의 본성 중에서 관찰과 이론에 초점을 둔 본 연구의 탐구 실험의 맥락에서 드러났다. 어떠한 탐구 실험의 맥락이 각기 다른 과학의 본성의 하위요소에 해당하는 인식론적 논제를 이끌어 낼 수 있을지에 대해서는 추가적인 논의가 필요하겠지만, 본 연구의 결과는 다양한 탐구 실험의 맥락에 따라 다양한 인식론적 논제의 가능성을 보여준다고 할 수 있을 것이다.

국문요약

이 연구는 과학 활동의 인식론적 논제에 초점을 둔 탐구 실험을 설계 및 시범 적용하고, 실험 활동과 반성적 논의를 분석하여 교육적 함의를 도출하고자 하였다. 사범대학 과학교육과에 소속된 대학원생 3명이 자발적으로 연구에 참여하였다. 연구참여자들은 실험 1에서 안정적 탐구의 특징을 보여주었지만, 실험 2의 작지만 지속적인 변화는 실험을 새로운 설명체계를 찾는 유동적 탐구의 국면으로 이끌었다.

연구참여자들은 여러 가지 밀천을 동원해서 새로운 가설과 모형을 제안하고, 이를 검증할 추가 실험을 요청하였다. 반성적 논의과정에서 연구참여자들은 다음과 같은 세 가지 인식론적 논제를 이끌어 냈다. 첫째, 실험 초기에 자신의 관찰이 이론 의존적이었다. 둘째, 관찰 사항이 더 이상 이론에 의존할 수 없는 위기 국면에 봉착하면 관찰과 이론의 조정이 진행된다. 셋째로 관찰과 이론의 관계에 따라 안정적 탐구나 유동적 탐구가 수행된다. 이상의 연구 과정과 결과를 토대로 도출된 예비교사 교육의 함의는 다음과 같다. 첫째, 이 연구에서는 안정적 탐구에 뒤이어 유동적 탐구가 자발적으로 진행 될 수 있음을 보였으며 그 활동의 예시를 함께 제시하였다. 둘째, 이 연구에서는 탐구에 뒤따른 반성적 논의를 통해 연구참여자들이 자신의 경험에 기반하여 인식론적 논제를 이끌어 낼 수 있음을 확인하였다.

주제어 : 인식론적 논제, 탐구, 실험, 안정적 탐구, 유동적 탐구

References

- American Association for the Advancement of Science (1993). *Benchmarks for Science Literacy*. New York: Oxford University Press.
- Barton, R. (2002). IT in practical work: assessing and increasing the value-added. In J. Wellington (Ed.), *Practical work in school science: Which way now?* (pp. 271-280). New York: Routledge.
- Baudrillard, J. (1983). *Simulations*. Foss, P., Patton, P., & Beitchman, P. (trans.), New York: Semiotext(e).
- Chinn, C. A., & Melhotra, B. A. (2002). Epistemologically authentic inquiry in schools: A theoretical framework for evaluating inquiry tasks. *Science Education*, 86(2), 175-218.
- Duschl, R., & Grandy, R. (2013). Two views about explicitly teaching nature of science. *Science & Education*, 22(9), 2109-2139.
- Fritschen, L. J., & Gay, L. W. (2012). *Environmental instrumentation*. New York: Springer Science & Business Media.
- Galison, P. (1996). Computer simulation and the trading zone. In P. Galison & D. Stump (Eds.), *The disunity of science: Boundaries, context, and power* (pp. 118-157). California: Stanford University Press.
- Galison, P. (1997). *Image and logic: A material culture of microphysics*. Chicago: University of Chicago Press.
- Gough, N. (2002) 'If this were played upon a stage...': school laboratory work as a theatre of representation. In J. Wellington (Ed.), *Practical work in school science: Which way now?* (pp. 156-172). New York: Routledge.
- Grandy, R. & Duschl, R. A. (2007). Reconsidering the character and role of inquiry in school science: analysis of a conference. *Science & Education*, 16(2), 141-166.
- Hodson, D. (1996). Practical work in school science: exploring some directions for change. *International Journal of Science Education*, 18(7), 755-760.
- Hodson, D. (2008). *Towards scientific literacy: A teachers' guide to the history, philosophy and sociology of science*. Rotterdam: Sense Publishers.
- Jeon, S., Kwak, Y., Koh, H., Lee, Y., & Choi, S. (2017). The needs analysis on science literacy required for Koreans in the future society. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 37(3), 441-452.
- Jho, H., & Song, J. (2011). The observation type of primary students and the effect of their views of science on observation activity in anomalous situation. *Journal of Korean Elementary Science Education*. 30(4), 405-414.
- Kang, N., & Lee, E., (2013). An analysis of inquiry activities in high school physics textbooks for the 2009 revised science curriculum. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 33(1), 132-143.
- Kim, M., & Kim, H. (2007). The effects of authentic open inquiry on cognitive reasoning through an analysis of types of student-generated questions. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 27(9), 930-943.
- Kim, H., & Song, J. (2004). The exploration of open scientific inquiry model emphasizing students' argumentation. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 24(6), 1216-1234.
- Kim, K., Noh, J., Seo I., & Noh, T. (2008). The effects of explicit and reflective instruction about nature of science using episodes from the history of science in 'composition of material' unit of middle school science. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 28(1), 89-99.
- Kim, S. (2012). Effects of simulated instruction activities through a constructivist lens on preservice biology teachers' epistemological belief, science teaching efficacy belief and teaching motivation. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 32(7), 1157-1168.
- Kim, Y., & Moon, S. (2003). An analysis of inquiry activities of the high school common science textbook (materials part) by using 3-dimensional analysis framework. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 20(2), 274-287.
- Kirschner, P. A. (1992). Epistemology, practical work and academic skills in science education. *Science & Education*, 1(3), 273-299.
- Ku, J., Kim, S., Lee, H., Cho, S., & Park, H. (2018). OECD Programme for international student assessment: Establishing a foundation of PISA 2018 Field Trial. Korea Institute for Curriculum and Evaluation Report of Research RRE 2016-2-1.
- Lehrer, R., & Schauble, L. (2012). Seeding evolutionary thinking by engaging children in modeling its foundations. *Science Education*, 96(4), 701-724.
- Lee, S., Lee, G., Choi, C., & Shin, M. (2012). Analyzing coordination of theory and evidence presented in pre-service elementary teachers' science writing for inquiry activities. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 32(2), 201-209.
- McComas, W. F., (2002). *The nature of science in education*. Dordrecht, Netherlands: Springer
- Ministry of Education, Korea (2007). *Science curriculum*. Seoul, Korea: Ministry of Education.
- Ministry of Education, Korea (2015). *Science curriculum*. Seoul, Korea: Ministry of Education.
- Moss, D. M., Abrams, M. D., & Kull, J. A. (1998). Can we be scientists, too? Secondary students' perceptions of scientific research from a project-based classroom. *Journal of Science Education and Technology*, 7(2), 149-161.
- National Research Council (2000). *Clean coastal waters: Understanding and reducing the effects of nutrient pollution*. Washington, DC: National Academies Press.
- National Research Council (2012). *A framework for K-12 science education: Practices, crosscutting concepts, and core ideas*. Washington, DC: The National Academies Press.
- Nott, M., & Wellington, J. (1996). Probing teachers' views of the nature of science: How should we do it and where should we be looking. In G. Welford, J. Osborne, & P. Scott (Eds.), *Research in science education in Europe* (pp. 283-295). London: The Falmer Press.
- OECD (2016). *PISA 2015 Assessment and analytical framework: Science, Reading, Mathematic and Financial Literacy*. Paris: Author.
- Park, J., Lee, S., Shim, H., Lee, G., & Shin, M. (2018). Analyzing the characteristics of pre-service elementary school teachers' modeling and epistemic criteria with the blackbox simulation program. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 38(3), 305-317.
- Roth, W. M. (1995). *Authentic school science*. Boston, MA: Kluwer Academic Publisher.
- Roychoudhury, A., & Roth, W. M. (1996). Interactions in an open-inquiry physics laboratory. *International Journal of Science Education*, 18(4), 423-445.
- Schwab, J. (1962). The teaching of science as enquiry. In J. Schwab, & P. Brandwein (Eds.), *The teaching of science* (pp. 1-103). Massachusetts: Harvard University Press.
- Schwab, J. (1964). The structure of the disciplines: meaning and significances. In G. W. Ford, & L. Pugno (Eds.), *The structure of knowledge and the curriculum* (pp. 1-30). Chicago: Grand McNally.
- Schwartz, R. S., Lederman, N. G., & Crawford, B. A. (2004). Developing views of nature of science in an authentic context: An explicit approach to bridging the gap between nature of science and scientific inquiry. *Science Education*, 88(4), 610-645.
- 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.
- Wardle, J. (2002). Virtual science: a practical alternative? In J. Wellington (Ed.), *Practical work in school science: Which way now?* (pp. 271-280). New York: Routledge.
- Wellington, J. (2002a). Epilogue. In J. Wellington (Ed.), *Practical work in school science: Which way now?* (pp. 282-284). New York: Routledge.
- Wellington, J. (2002b). Practical work in science: time for a reappraisal. In J. Wellington (Ed.), *Practical work in school science: Which way now?* (pp. 271-280). New York: Routledge.
- Woolnough, B. E. (2002). Authentic science in schools, to develop personal knowledge. In J. Wellington (Ed.), *Practical work in school science: Which way now?* (pp. 271-280). New York: Routledge.

- Wittgenstein, L. (1953) *Philosophical investigations*. Oxford: Oxford University Press.
- Yang, I., Cho, H., Jeong, J., Hur, M., & Kim, Y. (2006). Aims of laboratory activities in school science: A delphi study of expert community. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 26(2), 177-190.

저자 정보

박정우(서울대학교 박사후 연구원)

이선경(서울대학교 강사)

이경진(서울대학교 학생)

심한수(계원예술대학교 교수)

신명경(경인교육대학교 교수)