

# 실행-중심 과학교육을 위한 지식관의 재고와 과학적 모델링의 연관성

이혜경 · 이종혁 · 최진현 · 김관영 · 이선경<sup>†</sup>

## Rethinking the Knowledge Viewpoint in Practice-Oriented Science Education and its Relationship with Scientific Modeling

Lee, Hyekeoung · Lee, Jong-Hyeok · Choi, Jinhyeon ·

Kim, Kwan-Young · Lee, Sun-Kyung<sup>†</sup>

### 국문 초록

본 연구는 실행-기반 과학교육을 위하여, 과학적 실행이 무엇이며 어떻게 작동하는가를 이해하고 실행의 단위로서 모델링을 검토하였다. 이를 위하여, ‘과학적 실행은 무엇이며, 이때 지식은 어떤 특징을 가지는가?’와 ‘과학적 실행은 어떻게 작동하는가?’라는 질문을 출발로 하여 언어 중심의 지식관을 재고하고 과학적 실행과 과학적 모델링의 연관성을 탐색하였다. 이를 위하여 먼저, 과학적 ‘실행’이 갖는 복잡성과 비선형성에 주목하면서 과학적 지식을 활동이나 행동 그 자체로서 바라보았다. 즉, 언어 중심의 명시적 차원을 넘어 솜씨와 감식력 그리고 판단을 포괄하는 암묵적 차원으로 확장하였다. 다음으로, 과학적 실행의 복잡성과 비선형적 역동성을 담아내는 실행의 단위로서 특정 목적과 맥락에서 구체적으로 작동하는 모델링의 속성과 의미를 논하고, 구조화된 모델링과 비구조화된 모델링의 양상을 살펴보았다. 모델링은 이론과 현상을 매개하거나 혹은 자율적으로 이론을 참조하고 조정하는 과정으로서, 그 내용으로는 명시적 및 암묵적 지식으로서 관련 개념, 비유, 은유, 솜씨, 감식력, 판단 등이 중층적이고 역동적으로 구성되는 과정이다. 최종적으로 ‘과학교과를 실행으로서 가르치고 배우는 것’이 실제 과학교육 현장에서 인식론적이고 존재론적으로 얽힌 구체적인 모델링 활동이 되어야 한다고 보았다. 이러한 과학적 실행에서의 지식관과 모델링에 관한 논의를 토대로 과학 교수·학습에의 실천적 지침을 제언하였다.

**주제어:** 과학적 실행, 과학적 모델링, 복잡성, 비선형성, 암묵적 지식

### ABSTRACT

This study explored how scientific practice functions within practice-oriented science education and reviewed modeling as a unit of practice. Beginning with the questions “What is scientific practice and what is the nature of knowledge?” and “How does scientific practice work?” we reconsidered the language-centered view of knowledge and identified its relevance to scientific modeling. First, concentrating on the complexity and nonlinearity of scientific practice, scientific knowledge was considered to be the activity or action itself. We expanded the understanding of the nature of knowledge beyond the explicit and language-oriented dimension of activity or action to an implicit dimension that encompasses skills, connoisseurship, and judgment. Furthermore, we discussed the nature and meaning of scientific modeling as a unit of practice that accounts for the complexity and nonlinear dynamics of scientific practice; scientific modeling was one such unit that could contain complex practice and nonlinear dynamics. Additionally, the contextual properties and meanings of modeling that function were highlighted. Scientific modeling was understood as the process of mediating or autonomously referencing and adjusting theory and phenomena, including a layered and dynamic construction of related concepts,

analogies, metaphors, skills, connoisseurship, and judgments as explicit or implicit knowledge. We suggest that “teaching and learning science as practice” should be a concrete modeling activity that is epistemologically and ontologically intertwined with actual science education practices.

**Key words:** science practice, scientific modeling, complexity, nonlinearity, implicit knowledge

## I. 서론

학교 과학에서 ‘탐구(inquiry)’는 1950년대 후반부터 현재에 이르기까지 끊임없이 정의되고, 비판적으로 검토되며, 그 의미가 재고되어 왔다(Grandy & Duschl, 2007). 초기 탐구는 과정기능(process skill), 즉 기초탐구기능과 통합탐구기능으로 구분하여 제시되었고, 기능의 위계에 따른 교육과정이 개발되었다(오필석, 2020). 이러한 기능-기반 교육과정의 전제는 위계에 따른 각각의 기능에 숙달되면 전체의 과정은 기계적으로 진행된다고 보는 환원론적 관점에 있다. 즉, 학생들이 기능-기반 교육과정을 통과하면 과학자와 같은 탐구능력과 문제해결력을 갖추게 될 것이라고 본 것이다. 이 관점의 문제는 과학 활동의 통합적 전체성을 부분적 구성요소들의 단순한 합계로 취급한다는 데 있으며(Woolnough, 1989) 현대의 과학철학자들은 이와 같은 인식의 환원론적 견해를 부정한다(조희정, 1992). 이후 ‘탐구과정’으로 불리는 ‘관찰-가설설정-결론연역-관찰근거의 가설 수용 혹은 거부’가 과학적 방법의 전형으로 과학 교육에 적용되었다(Grandy & Duschl, 2007). 그러나 과학적 탐구와 관련된 많은 연구들에서는 탐구에는 특정한 하나의 절차나 방법이 존재한다기보다는 다양한 방식이 존재할 수 있으며(Abd-El-Khalick *et al.*,

2004; Irzik & Nola, 2010), 그 과정을 관통하는 주요 특징으로서 ‘질문하기’, ‘증거찾기’, ‘설명하기’, ‘평가하기’, ‘의사소통하기’ 등을 제시하였다(National Research Council, 1996)(Table 1 참조). 그 중에서도 과학적 탐구의 본질로서 ‘증거와 주장(설명, 이론)의 조정’이 강조되었으며, 과학수업에서 학생들은 관찰과 실험 자료를 근거로 관찰증거를 평가하고, 증거와 주장의 조정을 통해 자신의 개념을 변화시킬 수 있는 능력을 기를 것으로 기대되었다(이선경 등, 2013; Flick & Lederman, 2006; Grandy & Duschl, 2007; Havdala & Ashkenazi, 2007; Hodson, 2009; Leach, 1998; McNeill, 2011; Millar, 1998; National Research Council, 1996).

탐구의 핵심에 ‘증거’와 ‘주장’이 자리하는 것은 학교 과학에서 수행되는 전형적인 탐구에서 여실히 드러나며 지식(이론) 중심의 탐구활동으로 구성된다. 지금까지 학교 과학에서는 과학 지식을 학습하는 것을 목표로 하는 탐구 활동이 주로 펼쳐져왔으며, 이러한 탐구 활동에서는 과학적 ‘주장’과 이를 뒷받침하는 근거인 ‘증거’가 중요하게 다루어져 왔다(Wellington, 1998). 과학교육에서 ‘과학적 지식은 증명된 혹은 확증된 것이다’라는 생각은 ‘과학적 지식은 결코 증명되거나 확증될 수 없다’로 바뀐 지 오래되었다(김미경과 김희백, 2008; Khishfe & Abd-El-

Table 1. Inquiry and practice

탐구(inquiry)		실행(practice)	
	탐구기능(skill) (교육부, 2015)	주요 특징(key features) (National Research Council, 1996)	기능(skill) (교육부, 2015)
기초	예상, 분류, 의사소통, 추리, 관찰, 측정	질문하기(asking) 증거찾기(evidencing) 설명(주장)하기(explaining) 평가하기(evaluating)	질문하기 및 문제 규정하기 모델 개발 및 사용하기 탐구조사 계획 및 수행하기 자료 분석 및 해석하기 수학 및 진산적 사고 활용하기 설명 구성하기 및 해결책 설계하기 증거에 입각하여 논증하기 정보 수집과 평가 및 소통하기
통합	문제인식, 가설설정, 변인통제, 자료변환, 자료해석, 결론도출, 일반화(귀납)	의사소통하기(communicating)	practice (Next Generation Science Standards Lead State, 2013) asking questions developing and using models planning and carrying out investigations analyzing and interpreting data using mathematics and computational thinking constructing explanations engaging in argument from evidence obtaining, evaluating, and communicating information

Khalick, 2002; Lederman *et al.*, 2002; McComas *et al.*, 1998). 하지만 여전히 과학교육에서 탐구를 다루는 방식은 과학적 지식이 생성되는 과정이나 만들어져 가는 과정을 다루기보다는 과학적 이론을 증명하거나 확인하는 것에 초점을 두고 있다(Wellington, 1998). 과학 교과서나 수업에서 다루는 대부분의 탐구활동이 이론에서 연역된 사례로 이론을 증명하는 것을 다루거나, 혹은 이론에 얽혀있는 한 두 개의 변인으로 구성된 단순 실험으로 이론을 확인하는 것이 그 방증이 된다(Rudolph, 2005). 즉, 학교에서 주로 다루어지는 과학 탐구 활동이 관련된 증거에 기반하여 과학적 주장을 구성하는 구조로 지나치게 단순화되거나 이 과정에서 선형적으로 구조화된 일련의 탐구 과정을 따라 증거를 확보하고 그 증거를 기반으로 한 이미 주어져 있는 이론을 확인하는 것만을 목적으로 실행된다면, 학생들은 과학의 복잡한 양상 중 일부만 접하게 된다. 과학 활동의 다양한 국면과 양상, 즉 실제 과학적 실행이 다양한 행위자와 사건의 이질적인 구성이며(정용재, 2020; Latour, 1987), 이들이 복잡하게 얽혀있어 분리해내기 어려운 과정(Pickering, 1995)이라는 것을 ‘알’<sup>1)</sup> 수 없게 된다.

과학적 실행은 NGSS와 한국의 2015 개정 과학과 교육과정에서 유사하게 제시되었지만, 한국의 경우 ‘실행(practice)’ 대신 ‘기능(skill)’이라는 용어를 사용하고 있다(Table 1 참조). ‘실행’으로 제시된 것을 ‘기능’이라는 기존의 용어를 그대로 사용하는 이유가 제시되지 않은 채, 과학과 교육과정에 ‘기능’으로 등장한다는 것은 ‘실행’이 갖는 의미와 어떤 중요한 차이가 있는지 조명되지 못한 것일 수 있다. NGSS 개발의 청사진을 제공하였던 ‘A framework for K-12 science education (National Research Council [NRC], 2012)’에서는 이제까지 과학교육 문헌에서 자주 사용되었던 ‘기능(skill)’이나 ‘과정(process)’이라는 용어 대신 ‘실천(practice)’<sup>2)</sup>이란 용어를 사용하면서, “과학의 탐구에 임하는 데에는 그러한 실천에 특이적인 기능뿐만 아니라 지식 또한 필요하기 때문이라는 점을 강조하기 위한”(p. 30) 것이라고 설명하고 있다(오필석, 2020). 이는 과학적 실천은 내용-기반(content-based)이나 기능-기반(skill-based)의 관점을 넘어서서 내용(지식)과 기능이 떼어내려야 뗄 수 없을

만큼 강하게 결합된 채 이루어진다는 점을 지적한 것이라고 해석되며(Furtak & Penuel, 2019), 따라서 ‘기능’이라는 용어 사용은 부적절(오필석, 2020)하다는 비판이 제기되기도 하였다. 그에 따라, 과학적 실행이 무엇인지 그 속성과 역할에 대한 심도 있는 탐색과 논의가 요구된다.

‘과학적 실행’은 그동안 과학 탐구의 본질로 여겨진 증거-주장(Havdala & Ashkenazi, 2007; Kuhn *et al.*, 1988)의 지나치게 단순화된 선형적 구도를 벗어나, 실제 ‘과학자가 하는 일’, 즉 그 복잡한 과정으로서 이해된다(Crawford, 2014). 과학자들이 하는 ‘일’은 과학자들이 목표로 하는 활동에서 여러 인식적 실천들이 정합적으로 얽혀 작동하는 시스템(장하석, 2021)으로 이해되기도 하고, 이때 실천은 활동 맥락에서 발휘되는 역량으로 해석되기도 한다(오필석, 2020). 실제 과학적 연구와 유사한 측면에서 학교 과학의 탐구 과제를 평가하기 위한 틀(Chinn & Malhotra, 2002)에 따르면, 실제 과학적 탐구는 값비싼 장비, 정교한 절차 및 이론, 고도로 전문화된 지식, 데이터 분석 및 모델링을 위한 고급기술을 사용하는 복잡한 활동이다(Dunbar, 1995; Galison, 1997; Giere, 1988).

학생들은 과학과 관련된 지식을 단편적으로 습득하기보다는 전문 과학적 실행의 씨앗(seed)이 되는 과정으로서의 과학적 실행에 참여할 것이 권고된다(Berland *et al.*, 2016; Duschl *et al.*, 2007; National Research Council, 2012). 학생들의 실행도 실제 과학적 탐구와 마찬가지로 선형 궤적을 따르지 않고 활동 및 상호작용의 즉각적인 맥락에 따라 변화한다(Pierson *et al.*, 2017, 2019; Ford, 2015; Manz, 2015; Rouse, 2007). 실행-기반(practice-based) 관점은 활동에 참여하는 구성원의 지식, 인식 및 행동을 구성하는 방식이 지속적으로 유동적이며 실행이 새로운 문제 및 도구에 대응하여 변화한다는 점을 인정한다(Lehrer & Schauble, 2015; Pierson & Clark, 2019; Rouse, 2007). 때로 실행을 지향하는 과학교육의 접근들은 학생들이 다른 사람이 중요하다고 선택한 과학 지식의 내용을 학습하거나 실행을 흉내 내는 것을 목적으로 하면서(Millar, 2018; Paavola & Hakkarainen, 2005) 과학적 실행에 대한 부족한 이해

1) 여기서 ‘알’의 의미는 명시적 앎을 넘어서 암묵적 앎까지 포괄한다.

2) practice는 연구자에 따라 ‘실천’ 혹은 ‘실행’이라는 용어로 사용되고 있으며, 이 논문에서는 ‘실행’으로 사용하지만 인용문인 경우 원문 저자의 표현에 따랐다.

를 보이거나 실제 교육 현장에 도입하지 못하는 한계를 보인다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 과학적 실행의 본질과 실행으로부터 얻을 수 있는 교육적 가치를 이해하고, 학생들에게 진정한 실행의 맥락을 제공하기 위한 심도 있는 고찰이 전제되어야 한다(오필석, 2020).

이처럼 실행의 국면과 양상이 다양하고 불확실하게 전개되는 복잡성과 비선형적 속성을 갖기 때문에(신명경과 권경필, 2016; Louca *et al.*, 2004; Pierson *et al.*, 2019; Sikorski, 2019; Svoboda & Passmore, 2013) 교육과정에서 제시하는 것과 같은 몇 가지 과정기능들 혹은 탐구의 특징들의 조합으로 충분히 설명해내지 못한다. 즉, 과학적 실행의 복잡성과 비선형 과정(Pierson, Clark, & Kelly, 2019)은 NRC(1996)에 제시된 과학적 탐구의 특징(질문하기 외 4개 특징), 혹은 NGSS(2013)나 2015개정 과학과 교육과정(교육부, 2015)에 제시된 8개 실행으로는 그 총체적인 동시에 상세한 과정을 조명하기 어렵다(Table 1 참조). 그 이유는 실행의 복잡성과 비선형성에는 겉으로 드러나지 않고 조목화되지 않지만 실행 과정에서 늘 작동하는 암묵적 차원의 지식을 고려해야 하기 때문이다. 이것은 과학적 실행을 경험하고 그 과정에서 결정되는 ‘지식’에 대한 재고(정용재, 2020)를 요구한다.

한편, 과학자들이 하는 일은 특정 맥락에 놓인 현상(사건)을 이해하고 해석하기 위해 모델을 적용하거나 모델링을 통해 모델을 구성하기 때문에, 모델과 모델링은 현대 과학에서 상당히 중요한 위치에 있다. 과학사와 현재 과학자들의 실행에서 모델의 편재성(ubiquity)은 널리 인정되고 있으며, 실제로 모델 없이 과학을 생각하기 어렵다(Chiu & Lin, 2019; Matthews, 2007). 그에 따라, 과학교육에서도 모델 및 모델링에 관한 연구는 매우 광범위하게 이루어졌으며(조혜숙과 남정희, 2017), 모델링은 교육과정에서 과학적 실행의 한 측면, 구체적으로 ‘모델 개발 및 사용하기’로 제안되었다(Table 1 참조). 모델 개발은 모델을 구성하는 것을 의미하고 모델 사용은 구성된 모델을 적용하거나 기존의 모델을 사용하는 것을 의미하는 것으로 유추되지만, 과학교육 연구와 교육과정에서 강조되는 것에 비해 모델 및 모델링이 무엇이며 어떤 역할을 하는지에 대한 설명은 충분치 않다(김관영 등, 2022a; Chiu & Lin, 2019). 모델의 의미와 역할을 이해하기 위해서는 모델은 이

론과 어떤 관련이 있고 어떤 차이가 있는지를 모색하는 것으로부터 출발해야 하는데, 최근 연구에 따르면 모델은 세계(현상 혹은 사건)와 이론을 매개하는 도구로(Bailer-Jones, 2009; Giere *et al.*, 2006; Morgan & Morrison, 1999) 자리매김하며, 더 나아가 자율적으로 작동하는 속성이 고려되기도 한다(Morgan & Morrison, 1999). 후자의 경우, 모델은 이론과 자료와는 일부 독립적으로 구성되는 측면이 있어서 과학적 지식을 생성하는데 나름의 생명력과 공간을 갖는 것이다. 이러한 논의에 기반하여, 본 연구에서는 모델링을 과학적 실행의 단위로 간주하고, 과학적 실행의 복잡하고 비선형적인 과정을 통틀어 모델링 과정으로 일컫는다.

모델에 대한 철학적 논의를 토대로 하면, 과학 교수·학습을 위해 모델은 크게 두 가지 기능, 즉 모델 ‘사용’과 모델 ‘구성’이 가능하다(Morgan & Morrison, 1999). 구조화된 문제 상황에서는 이론을 확인하고 증명하기 위해 전형적인 모델을 ‘사용’하는데 초점이 있으며, 이때 모델링은 이론에 구속된다. 문제 상황에서 현상이 제공되는 경우 모델링은 특정 모델들(이를 테면, 법칙이나 방정식 등)의 선택과 조합 및 배열 등이 대체로 규정되어 있어서 적절한 모델들을 사용하면 문제를 해결할 수 있게 되는 것이다. 그러나 비구조화된(ill-structured) 문제 상황에서는 학생들이 초점을 맞추어야 할 현상이 무엇인지 명시적으로 제공되기보다는 복잡한 현상 그 자체가 학생들에게 펼쳐진다. 게다가 학생들은 초점 현상을 설명하기 위해 가용한 자원(resources)이 있는지 스스로 탐색하고, 여러 이질적인 자원들을 능동적으로 동원하고 재조합하는 비선형적 과정을 거쳐 모델을 ‘구성’하게 된다(Boumans, 1999). 이때 모델링에는 이론 외에 가용한 자원들은 모두 동원되기 때문에, 이론에서 연역된 모델을 구성하는 것을 넘어서 여러 가지 다양한 방법이 수행될 수 있다(Boumans, 1999).

한편, 모델 및 모델링 과학교육 연구에서는 대체로 모델 ‘구성’에 초점을 두는 와중에 모델의 구성과 모델의 ‘사용’을 엄격하게 구분하지 않고 사용하는 경향이 있다. 예를 들어, 모델 구성을 학습의 목표로 하는 교수·학습 접근에서는 주로 학생들이 특정 문제 상황을 잘 설명할 수 있는 하나의 목표 모델(target model)을 스스로 ‘구성’하는 것을 추구한다. 즉, 구조화된 문제 상황에서는 이론과 그에 대한 전

형적인 모델이 존재하지만 학생들에게 그것을 알려 주지 않고 스스로 구성하도록 하는 것이 교수·학습의 목표가 된다(강은희 등, 2012; 김지윤 등 2016; 박희경 등, 2016; 양찬호 등, 2016; 이신영 등, 2012; 이차은과 김희백, 2016; Mendonça & Justi, 2011; Passmore & Svoboda, 2012; Rea-Ramirez *et al.*, 2008). 하지만, 이러한 접근은 학생이 스스로 현상에 대한 과학적 모델을 구성한다기보다는 교수자가 제시한 문제 상황에 가장 적절한 목표 모델을 찾아내고, 이를 활용하여 현상을 과학적으로 설명해내는 활동으로 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 모델의 ‘사용’뿐 아니라 이를 넘어선 진정한 모델 ‘구성’으로 과학 교육의 목표를 확장해야 한다고 주장한다. 이를 위하여, 모델의 ‘사용’과 ‘구성’을 구분하고, 비구조화된 문제 상황에서 작동하는 모델 ‘구성’ 과정을 모델링으로 보고자 한다. 이때 모델링의 속성은 다른 과학적 실행의 특징들을 포괄하는데, 이를테면 모델링에서 문제를 규정하고 전산적 사고(computational thinking)를 하고 자료를 수집하고 설명을 만들고 하는 등의 여러 실행들(Table 1 참조)이 비선형적으로 오가며 중첩되고 교직되기 때문이다. 모델링을 8개 실행들의 중심에 두고 구조화된 전형적인 모델을 ‘사용’하는 경우를 넘어서 비구조화된 문제상황을 해결하기 위해 모델을 ‘구성’하는 과정으로서 본다면, 과학적 실행의 복잡성과 비선형적 과정에서 모델링을 유동적 과정으로 볼 수 있다.

이에, 본 연구는 과학교육에서 과학적 실행이라는 총체적이면서 동시에 면밀한 흐름을 조명하고 교수·학습 과정으로 의미화하는 것을 목적으로 한다. 우리의 논의를 안내하는 연구 질문은 1) 과학적 실행은 무엇이며, 이때 지식은 어떤 특징을 가지는가?, 2) 과학적 실행은 어떻게 작동하는가? 이다. 이를 위하여 본 논문은 먼저 과학적 실행에서 작동하고 조형되는 지식에 대한 관점을 재고하여 이론 중심의 명시적 지식뿐 아니라 실행에서 작동하는 암묵적 지식을 포괄하는 것으로 확장하여 자세히 살펴보고자 한다. 그리고 암묵적 지식을 포괄하는 과학적 실행의 구체적 작동 단위로서의 모델링을 검토하고, 다양한 스펙트럼을 갖는 모델링의 양상을 탐색하고자 한다. 이에 본 연구와 관련되는 학문 분야의 국내외 문헌을 검토하여, 과학적 실행을 기존의 인식론과는 다른 차원에서 검토하고, 이에 비추어 과학적 실행의 실체를 모델링으로 구체화하고자

하였다.

## II. 과학적 실행과 지식관

지금까지 과학교육에서 주로 다루어져 온 교육 내용과 그 접근은 명시적 지식을 기반으로 하는 과학적 지식과 탐구로 개념화되었다. 반면, 과학적 실행은 과학 지식을 만들어내는 복잡하고 실제적인 과정 그 자체에 초점을 맞추고 있다. 따라서, 언어를 기반으로 하는 명시적 지식을 포함하면서, 언어로써 표현하기 어려운 지식까지도 포함하는 확장된 지식관이 요구된다. 즉, 실행 중심의 과학을 이해하기 위해서는 과학 지식과 탐구가 서로 얽혀있으며, 동시에 서로를 구성하는 것으로 보는 통합적인 시각으로 지식의 생성과 학습을 이해하는 것이 요구된다. 따라서, 이 장에서는 명시적 지식 중심의 인식론의 차원을 넘어서 암묵적 지식을 포괄하는 Polanyi의 인식론을 고찰하고, 이와 맥을 같이 하는 Oakeshott의 능력으로서의 지식관을 보충하여 살펴본다.

### 1. 과학적 실행에서 증거-주장의 선형적 구도의 한계: 명시적 지식 중심 접근

과학교육에서 취하고 있는 과학적 지식에 관한 인식론은 전통적 관점을 벗어나 현대 과학철학적 관점을 취하고 있으며, 그 경계를 가르는 테제(these)는 ‘관찰의 이론의존성(Theory-laden Observation)’이다(장하석, 2015; Ladyman, 2012). 전통적 관점인 근대 합리주의 철학 및 객관주의 인식론에서는 지식이란 이성의 능력이 낳은 명석 판명한 것, 혹은 감각기관을 통해 관찰 가능하고 입증 가능한 것으로 보고 있으며, 따라서 과학적 지식이 객관적이라고 주장한다(Suppe, 1977). 하지만 ‘관찰의 이론의존성’은 전통적 관점에 기반한 ‘관찰의 객관성’을 비판하고 ‘이론의 등에 업힌 관찰’로서 관찰과 이론의 관계를 새롭게 설정하였다(이선경과 신명경, 2023). Kuhn(1970)을 위시한 현대 과학철학은 ‘관찰의 이론의존성’을 토대로 과학적 지식의 구성주의 인식론을 전개하였다.

‘관찰의 이론의존성’ 테제로 인한 지식에 대한 관점 변화는 과학교육에 수용되어 교수·학습에서 과학적 지식을 다루는 방식에 큰 변화를 가져왔다. ‘관찰의 이론의존성’은 ‘구성주의’라고 하는 인식론적

관점으로 전개되었고, 그에 따라 지식의 본질, 그리고 학습과 학습자에 대한 관점의 변화를 이끌어내었다. 구성주의를 토대로 한 많은 과학 교수·학습 접근은 학습자의 선개념을 출발로 하여 과학적 활동 및 실행의 과정을 통한 학습자의 지식, 개념, 이론의 변화를 목표로 하였다. 이때 학습자의 개념은 언어 중심의 기호(말, 글, 표, 그림, 그래프 등)로 표상되고, 그림이나 그래프 등의 기호는 언어적 설명이 부가적으로 필요했다. 따라서 자연스럽게 학습자의 개념 변화 과정의 중심에는 ‘언어’가 자리하게 되었고, 특히 언어가 중심이 된 후기 구성주의 관점에 따라 과학교육 연구는 대체로 언어적 상호작용(interaction), 논변활동(argumentation), 사회·문화적 지식의 공동생성(co-generation), 의사소통의 특징(권위적-대화적, 상호적-비상호적)을 파악하고 효과적인 교수·학습 특징과 전략을 논하는 방식으로 이루어져 왔다(e.g., Chinn & Melhotra, 2002; Garcia-Mila & Anderson, 2008; Grandy & Duschl, 2007; Jimenez-Aleixandre & Erduran, 2008; Kuhn & Franklin, 2006).

과학교육에서 언어가 강조되면서 학습 과정에서 발생하는 다양한 방식의 비언어적인 활동은 언어의 활성화와 정교화를 위한 ‘맥락’이나 ‘배경’으로 간과되는 경향이 있었다(김관영 등, 2022a). 과학교육 활동에서 언어가 전경에 배치되고, 그에 따라 언어에 부가된 비언어적인 것들은 배경으로 밀려나는 것이다. 이를테면, 실험이나 예증 등과 같은 학생들의 활동을 다루는 연구들에서는 참여 학생들이 어떤 담화를 어떻게 나누었는가와 관련된 언어적 상호작용이 전경에 배치되는 반면, 활동 참여에서 이루어지는 여러 동작이나 행위 등의 비언어적 양상은 언어의 변화를 위한 맥락인 배경으로 밀려났다. 이와 같은 과학 활동에 대한 언어 중심의 이해 방식은 과학교육의 목적이 지식의 생성에 있고, 그 지식이 언어를 중심으로 한 명시적인 것일 때 주효한 접근이다(Hardahl *et al.*, 2019). 하지만, 실제의 과학적 실행 및 과학 지식의 구성은 언어로서 담아내기에는 충분하지 않은데, 다양한 행위자가 얽힌 복잡한 활동으로서의 실행을 언어에 집중하여 접근한다면 실행의 일부만 조명하게 되는 셈이다(Hardahl *et al.*, 2019). 결국, 구성주의 인식론이 지식관을 변화시켰지만, 과학학습에서 언어적 활동이 강조되고 비언어적인 활동은 배경으로 간주되면서 명시적 지식 중심의 지식관에서 크게 벗어나지 못한 한계를 보인다.

마찬가지로, 과학적 탐구도 그 핵심에 언어적 논변(argumentation)이 자리하면서 증거·주장의 구도를 중심으로 전개되었다. 과학적 탐구는 구조화된 것에서부터 비구조화된 것에 이르기까지 다양하게 고려되지만, 증거·주장의 관계가 탐구의 중심으로 다루어지는 한, 지식에 대한 관점은 여전히 언어적 차원의 명시적 지식에 국한되기 마련이다. 일례로, 학교 과학에서 수행되는 전형적인 탐구를 보면 학생은 교사나 교과서가 제시하는 문제를 수용하고, 제시된 절차에 따라 증거를 찾고, 그 증거에 기반한 주장을 만들어야 한다. 탐구 과정은 절차대로 수행되므로 그 과정에서 작동하는 비언어적인 행동이나 행위는 의미 있게 고려되지 않고, 언어화된 증거나 주장은 발화 혹은 문자로 기록되어 명시화된다.

그러나 과학적 탐구가 증거·주장의 구도 하에 언어를 중심으로 이해될 때, 크게 두 가지 문제가 발생한다. 하나는 자료를 얻고 증거를 만드는 과정의 ‘복잡성’이 무시되는 것이고, 다른 하나는 관찰로부터 주장/설명으로 이르는 과정이 ‘선형적’으로 깔끔하게 이루어질 것(Millar, 1998)이라고 하는 낙관적인 신념이 그러하다. 과학 탐구에서 자료(혹은 현상)는 대체로 주어지기 때문에 학생들은 전형적인 현상을 다루며 그 현상 자체가 자료이며 동시에 증거가 된다. 또, 일련의 탐구 과정은 만일 교사가 수업에서 관찰 사실을 신중하게 구조화하고 배열한다면, 관찰로부터 주장/설명이 ‘나타날 것’이라는 생각에 바탕을 두고 있다. 이러한 생각은 우리의 지식이 편견 없는 관찰에서 비롯되고, 관찰을 통해 유형과 규칙성을 식별하여 설명에 도달할 수 있다는 귀납적 성격을 바탕으로 한다. 혹은 그 반대의 경우로, 이론을 전제로 두고 그 이론에 해당되는 특정 사례를 예시 혹은 예증하는 활동도 마찬가지이다. 구조화된 한두 가지 사례를 적용하여 이론을 확인하는 활동은 학교 과학에서 지배적이다. 즉, 참인 이론으로부터 연역된 사례가 다시 이론을 증명하는 순환적 과정이 된다.

증거-이론의 구도는 단선적이고 깔끔하다. 관찰/현상으로부터 이론으로 향하거나 혹은 이론으로부터 연역된 관찰/현상을 드러내는 방식은 인과율에 따른 관찰/현상과 설명/이론의 관계라는 단순한 구조를 갖는다. 관찰/현상을 드러내는 과정의 복잡성이나 설명에 관여하는 다중적 변인들은 무시되고, 선형적 인과 관계만이 깔끔하게 드러내는 것이다.

그러나 학교 과학의 실제에서 탐구 과정은 늘 안정적으로 진행되지 않는데, 그렇다고 문제시되지도 않는다. 구조화된 탐구에서조차 학생들이 교과서가 요구하는 결과를 얻지 못한 채 실험을 마치는 경우가 빈번하지만, 그 이상으로 나아가지 못한다. 비구조화된 탐구의 경우에도 그 문제는 해결되지 않는데, 학생들이 증거를 찾기 위한 복잡한 과정은 무시되고 블랙박스화되어 버리기 일췌이며, 잘 조직화되어 제시된 증거를 바탕으로 결론을 도출하는 과정에 집중되기 때문이다. 비구조화된 탐구에서 학생들은 무얼 어떻게 해야 하는지 모르는 혼돈 상태에 놓이고 그 상태를 극복하지 못한다.

증거와 이론의 조정에 초점을 둔 탐구 활동이 늘 실패를 담보하진 않으며 교육적으로 성공적인 경험을 낳기도 한다. 증거를 기반으로 이론을 이해하는 것은 매우 효과적인 방식이며, 증거의 범위를 넓히고 이론의 확장 및 정교화를 허용하기도 한다. 그럼에도 불구하고, 증거-이론의 선형적 구도에만 머무르는 실행이라면 그 구도가 굳건할수록 지식과 탐구의 얽힘과 짜임에 관여하는 여러 실행의 양상들(예, 현상과 증거가 만들어지는 과정, 증거와 이론의 교직과 순환적 발달)은 끼어 들 자리가 없다.

## 2. 과학적 실행의 복잡성과 비선형성:

### 암묵적 지식과 판단 영역의 포괄

앞서 살펴보았듯이, 실제 탐구에서 증거를 만들어가는 과정은 복잡하며 고정된 선형의 경로를 따르지 않는다. 이상화된 조건을 전제하며, 그 속에서 한두 개의 변인을 다룬 단순 탐구실험이 추구하는 바와 달리, 실제 실행에서는 수많은 변인들이 제거되지 못한 채 복잡하게 얽혀있기 때문이다. 실행의 복잡한 과정을 거쳐 가는 것은 학습자의 구체적 활동 속에서 확인되는 경험의 세세한 흐름이기 때문에 기계적으로 재단되지 않으며 하나의 양상으로 규정하기 어렵다.

구체적 활동에서 확인되는 경험의 세세한 흐름은 말할 수 있는 인식의 문제라기보다는 말할 수 없는 암묵적 지식이 폭넓게 관여하는 존재의 문제이다. 그럼에도 불구하고, 앞서 논의한 바와 같이 지금까지 과학교육에서 강조되어왔던 주제들, 예를 들어, 증거와 이론의 조정, 그리고 그 조정이 언어 중심의 논변적이라는 탐구의 특징을 고려하면, 지식 생성으로서의 탐구 과정에서는 언어적 차원의 명시적 지

식의 생성에 초점이 있으며 비언어적 차원의 암묵적 지식은 간과되기 쉽다. 거꾸로 말하면, 암묵적 차원의 지식을 받아들이면 증거-이론의 단순 구도를 재고해야 할 필요가 있다. 암묵적 지식은 무엇이며, 명시적 지식과 어떻게 관계하며, 어떻게 작동하는가? 이 질문에 대한 적절한 답을 찾기 위해, 우리는 Wittgenstein, Polanyi, Oakeshott의 논의를 참조할 것이다.

일찍이 Wittgenstein(1889~1951)은 그의 저서 『논리-철학 논고』를 통해 “말할 수 없는 것에 대해서는 침묵해야 한다.”라고 언명하며 ‘말할 수 있는 것’과 ‘말할 수 없는 것’의 차이를 분명하게 구분하고자 했다(Wittgenstein, 1953). 그는 기존의 모든 철학적 문제가 애초에 ‘말할 수 없는 것’에 해당하는 종교, 윤리학, 미학 등을 말하려고 시도하는 과정에서 애매모호한 언어가 사용되었기 때문이라고 진단했다. 그렇다고 Wittgenstein이 ‘말할 수 없는 것’을 평가절하한 것은 아니다. 오히려 그는 ‘말할 수 없는 것’이 ‘말할 수 있는 것’에 해당하는 명제나 사실의 차원이 아닌 ‘더 높은 차원의 것’이라고 말한다.

그렇다면 교육적 맥락에서 더 높은 차원의 ‘말할 수 없는 것’은 어떻게 전달할 수 있을까? 이는 Wittgenstein의 후기 철학에서 실마리를 찾을 수 있다. Wittgenstein의 후기 철학은 더 이상 ‘말할 수 있는 것’과 ‘말할 수 없는 것’을 분명히 구분하지 않는다. 대신에 그는 언어가 활동과 뒤얽혀있는 언어게임(language game)에 비유될 수 있다는 점, 그리고 언어의 의미를 알기 위해서는 언어게임 내에서의 언어의 사용에 주목해야 한다는 점을 강조한다(구리나, 2014). 다시 말해, 언어가 작동하기 위한 전제이자 토대가 되는 ‘삶의 형식’(form of life)은 언어게임을 통해 파악할 수 있으므로, 우리에게 중요한 ‘말할 수 없는 것’을 전달하기 위해서는 끊임없이 ‘말할 수 있는 것’들을 말해야 한다는 것이다(구리나, 2011). 현재까지도 우리의 과학관에 깊게 뿌리내리고 있는 논리실증주의가 논리적 증명이나 경험적 관측을 통해 검증이 가능한 이론, 즉 ‘말할 수 있는 것’에만 가치를 부여해왔다. 하지만 논리실증주의에 큰 영향을 준 Wittgenstein의 철학은 ‘말할 수 있는 것’을 말함으로써 그 자체를 전달함과 동시에, 나아가 더욱 높은 차원에 존재하는 ‘말할 수 없는 것’을 전달하는 방법임을 강조한다.

이와 유사하게 Polanyi(1891~1976) 역시 언어로

써 표현하기 어렵지만 행위를 총체적으로 포함하고 있는 지식, 즉 암묵적인 지식을 강조하였다. 그는 “우리는 우리가 말할 수 있는 것보다 더 많은 것을 알고 있다.”면서 암묵적 지식의 중요성을 밝혔다(Polanyi, 1958). Polanyi가 제시한 암묵적 지식이 Wittgenstein의 ‘말할 수 없는 것’과 정확히 동일한 것은 아니지만, 인간의 지식이 단순히 말할 수 있는 것만으로 이루어져 있다는 관점을 해체하고 지식의 지평을 확장하는 데 기여하였다. 암묵적 지식이 중요한 이유는 단순히 말할 수 없는 앎이 있다는 것을 넘어서 그런 앎에 의존하지 않고는 아무것도 말할 수 없기 때문이다. Polanyi가 말하는 순수한 명시적 지식은 존재하지 않으며 모든 지식은 암묵적이거나 암묵적 지식에 뿌리를 두고 있기 때문이다(유근복 등, 2022). Polanyi가 밝힌 과학지식을 빙산 구조로 비유하면, 빙산의 상부(10%)는 ‘명시적 지식’인 ‘초점식’이고, 하부(90%)는 ‘암묵적 지식’인 ‘보조식’을 의미한다. 하부에 해당하는 ‘보조식’, 즉 말할 수 없는 지식의 영역은 언어로 외연화될 수 없기 때문에 그 동안 간과되어 왔으나, ‘명시적 지식’과 ‘초점식’은 모두 ‘암묵적 지식’과 ‘보조식’의 도움을 받는다는 의미에서 중요한 지식으로 제시되었다(김만희, 2003).

Wittgenstein과 Polanyi의 주장을 연관하면, 명시적 앎(말할 수 있는 것)과 암묵적 앎(말할 수 없는 것)이 상보적 관계에 있다고 볼 수 있다. Wittgenstein에게 반영되어 있는 교육적 고려는, 교육은 겉보기에는 단순히 ‘말할 수 있는 것’을 말하는 것처럼 보이지만, 그것이 인간의 가치관과 신념 등을 배제하지 않는 한, ‘말할 수 없는 것’을 어떤 방식으로든 전달한다는 데 있다. 그러나 ‘말할 수 없는 것’은 ‘말할 수 있는 것’을 통해 전달해야 한다는 Wittgenstein과 달리, Polanyi는 우리가 무언가를 ‘말할 수 있는’ 초점식으로 인식할 때 그 이면에는 우리의 일부가 된 지식이지만 ‘말로 설명할 수 없는’ 보조식이 기능적으로 상호작용하여 온전한 인식 활동이 이루어진다고 설명한다. 이들의 주장을 통합하면, ‘말할 수 없는 것’은 ‘말할 수 있는 것’을 통해서 전달(구리나, 2011) 혹은 말할 수 있는 것을 온전하게 인식(Polanyi, 1958)하게 해주는 역할을 하는 것이다. ‘말할 수 없는 것’, 즉 ‘보조식’의 예는 망치질, 자전거 타기, 우비 감별, X선 사진 판독, 외과의사의 지식, 감식력과 같은 각종 판단, 피아노 연주, 맹인의 지팡이 등으로

다양하다(Polanyi, 1958). 보조식은 이미 인간 존재의 일부가 된 일종의 체험구조요 인간 마음의 핵심부에 닿은 지식이며, Oakeshott의 실제적 지식에 대응한다(김만희, 2003).

Oakeshott(1992)는 언어나 기호와 같은 상징으로 정확하게 형식화시킬 수 있는 ‘기법적 지식’(technical knowledge)에 대비하여, 언어나 기호를 통하여 형식화할 수 없는 것으로서 일을 수행하는 관계적이고 전통적인 방식 또는 실천을 통해서만 드러나는 ‘실제적 지식’(practical knowledge)을 개념적으로 구분했다(김만희, 2003). 예컨대, 요리책에 적혀있는 요리법이나 과학책에 나열된 실험방법이 기법적 지식이라면, 실제로 요리를 하거나 과학 활동 중에 요구되는 솜씨나, 감식력, 판단과 같은 것이 실제적 지식이다. Oakeshott(1992)이 개념적으로 구분한 기법적 지식과 실제적 지식은 각각 ‘정보’와 ‘판단’에 대응되는데, 이들의 결합으로 지식의 다양한 능력이 구체적으로 표현된다. 정보만으로는 온전한 지식이 될 수 없고, 어떤 행위를 수행하거나 능력을 발휘하기 위해서는 반드시 ‘판단’이 필요하다. 판단은 지식의 암묵적이고 동적인 측면을 나타내며, 정보로 환원되거나 규칙이나 명제의 형태로 기술되기 어렵다. Oakeshott(1992)는 지식을 다양한 종류의 구체적인 능력으로 규정했는데, 그때 능력은 사람들이 무엇인가를 안다고 할 때 그들의 머릿속에 들어있는 지식의 항목을 가리키는 말이 아니라 극히 구체적인 일을 ‘할 줄 아는’ 상태를 가리키는 것이다(노철현, 2011). 말하자면 정보만으로는 무엇인가를 한다든가, 만든다든가, 이해한다든가, 설명하는 능력이 생기지 않는다. 정보의 의미를 이해하고 그것을 활용할 줄 아는 것, 그리고 그 이상으로 정보를 사태에 맞게 적절히 사용하는 것 등과 관련된 능력의 발휘는 오직 판단에 속하는 일이다(고영준, 2012).

정리하면, ‘말할 수 있는’ 초점식(명시적, 정보)과 ‘말할 수 없는’ 보조식(암묵적, 판단)은 서로를 포함하며 드러내고 전달하고 만들어주는 작용을 한다. 명시적 지식은 표현할 수 없고 비분절적인 암묵적 지식에 의존하여 작동하며, 거꾸로 암묵적 지식은 명시적 지식을 통하여 전달된다. 이를 테면, 논변이 잘 이루어진 언어적 활동(명시적 지식)은 솜씨나 판단과 같은 비언어적 차원(암묵적 지식)과 얽혀 있다. 명시적 지식은 암묵적 지식에 뿌리를 두고 있으며 거꾸로 언어 중심의 논변 활동은 과학적 태도라는



비언어적 활동을 전달해준다. 즉, 인간의 활동에서 언어와 비언어는 상호보충(補足)적 관계로서 결합된 전체이며, 기능적으로 작용함으로써 구체적이고 실천적인 것이 된다.

### 3. 과학적 실행: 활동 혹은 행위 그 자체로서 지식

지식을 명시적·암묵적 차원을 포괄하는 것으로 확장하면, 교수·학습 내용으로서의 지식도 인식론적 차원에서 존재론적 차원이 층층이면 얽혀있는 것으로 확장되어야 한다. 존재론적 차원에서 지식을 ‘안다’는 것은 ‘할 수 있다’ 혹은 ‘한다’는 것을 의미하는데, 이는 언어적 행동과 비언어적 행동을 포괄하는 더 확장된 차원을 의미한다. 그러나 여전히 과학교육에서 학습의 성취기준은 주로 증거가 되는 현상을 ‘관찰하고 비교할 수 있다’, ‘설명할 수 있다’ 그리고 ‘토의할 수 있다’ 등과 같은 명시적 준거를 제시하며, 이때 글(예, 지필 평가) 또는 말의 언어적 활동이 주로 학습의 목표에 등장한다(교육부, 2015). 즉, 과학교육에서 학습의 성취의 기준으로써 언어적인 차원의 요소들에 집중하기 때문에, 그 기저 혹은 이면에 얽혀있는 비언어적인 암묵적인 지식은 상대적으로 강조되고 있지 못하다.

앞서 논의하였던 바와 같이 명시적 지식에서 벗어나 언어적 및 비언어적 총체로서의 지식을 말한다면, 새로운 지식관에 따라 학습을 바라보는 관점 역시 확장되어야 한다. 확장된 관점에서 지식의 인식론적 차원에 암묵적이고 판단이 얽힌 복잡성을 고려하면, 학습의 출발은 체험과 활동에서 이해가 발생하고 그 이해가 확장되고 정교화되는 과정으로 볼 수 있다. 이해는 앎의 인식론적 차원을 존재론적 차원으로 본다는 것을 뜻하며 존재론적 차원은 앎이 활동과 얽혀있음을 뜻한다. Dewey는 지식의 영역과 인간 활동의 영역은 결코 분리되어있는 것이 아니라는 점을 분명히 했다(한기철 등, 2010; Dewey, 1987, 2002). 지식은 원래 활동으로부터 나온 것이고 다시 활동으로 돌아간다는 것이다. 지식은 우리 마음 밖에 객관적으로 존재하고 우리는 다만 그것을 우리의 감각기관과 이성을 동원하여 획득하는 것이 아니다. 지식은 그 자체로 인간의 몸이 환경과 부단

히 교섭하는 과정이다. 그 교섭의 과정 중에, 혹은 그것이 종결된 후에 그것의 결과물이 산출될 수 있고 우리는 그 결과물을 여러 다양한 필요에 의해 문자 등의 매체를 이용하여 저장할 수 있다. 그것은 그 자체로는, 역동적으로 진행되는 우리의 지적 활동을 충분히 표현하지 못한다. 우리는 오직 문제 상황에 직접 부딪쳐서 씨름하고 자기 자신의 해결책을 모색하고 발견할 때에만 사고를 한다. 인간이 사물에 관하여 무엇인가를 알아내기 위해서는 그 사물에 대하여 무슨 일인가를 해야 한다(Dewey, 1987).

이처럼 지식관을 확장하면 지식을 학습하는 것을 과학적 활동에 참여하여 총체적으로 경험하는 것을 의미한다. 지식이 활동과 구분되지 않는 것은 해석학자인 Heidegger의 앎의 존재론적 차원, 그리고 Merleau-Ponty의 몸철학에서 더 구체화된다. Heidegger (1962)는 인식에 대한 Kant의 질문, 즉 “우리는 이것을 어떻게 아느냐?”라고 하는 질문이 너무 늦게 던져진다는 것을 비판하면서, 언어적 설명 이전에 우리가 이것을 행하고 있다면 아는 것이라는 ‘수행성(performativity)’을 강조하였다. 우리가 컵을 인식한다는 것은, Kant에 의하면 컵이라는 경험 자료가 우리의 선험적 인식 범주, 이를 테면 12범주)에 의해 범주화되고 이를 종합하여 ‘컵’이라는, 인식을 구성하는 것이다. 그에 대해 Heidegger는 누군가에게 ‘컵을 가져오라’고 요청했을 때 그가 컵을 가지고 온다면 그 행위를 통해 그는 ‘이미’ 컵을 이해하고 있다고 본다. 즉 컵을 말로 설명하기 전에 이미 그는 컵을 알고 있으며, 이는 ‘선인식, 후행동’이 아니라 ‘선행동, 후인식’, 혹은 행동과 인식은 함께 하는 것으로 본다. 이때 이해는 인식론적 차원을 넘어서 전체를 보는 선이해의 암묵적인 존재론적 차원을 포괄한다. 컵을 가져오라는 요구에 대한 반응인 컵을 가져가는 행동이 이루어지는 것은 이미 컵이라는 도구와 관계된 맥락인 전체적 선이해를 암묵적으로 가지고 있기 때문이다. 이후, 컵이 무엇인가에 대한 탐색은 전체적 맥락 속에서 컵만 따로 떼어낸 추상, 다시 말해 맥락에서 유리된 컵이라는 대상에 대한 반성적 고찰이 이루어지는 것이다. 즉, Heidegger (1962)의 주장은 일상적인 인간의 가장 기본적인 표현은 개인의 자기 결정적인 행동에서 나온 것이 아니라 ‘무엇을 하는가’에서 나온다고 본 것이다

3) 많고 적음을 나타내는 분량(양: 전체성, 다수성, 단일성), 유무 혹은 여부를 나타내는 성질(질: 실재성, 부정성, 제한성), 관계(실체성/지속성, 인과성/후속성, 상호성/동시성), 양상(가능성, 현존성, 필연성)의 12개 선험적인 범주를 뜻한다.

(Rouse, 2007).

더 나아가, Merleau-Ponty(2013)는 세계를 이해하는 것으로서 몸-주체는 체험 활동을 열어간다고 보았다. 그는 시·공간 속에서 주어진 대상과 맞물려 있으면서 이를 인식하고 지각하는 주체로서 인간의 ‘몸’에 초점을 맞추었다. 그리고 이때의 몸은 인간의 주관에 대한 단순한 대상이라기보다는 인간의 주관성의 일부를 구성하고 있는 것이며(Mathews, 1999), 따라서 그에 따르면 전통적으로 주체와 객체 혹은 인간의 정신과 몸으로 나뉘었던 엄격한 이분법은 적용되지 않는다. 몸은 실천적 장에 속해있고, 또 그 실천적 장에 참여하는 가운데 행위하고 실천하며 살아가는 주체이기 때문이다(Kwant, 1963). Merleau-Ponty가 말하는 몸-주체는 심리학적 접근에 따라 인간의 몸을 의식을 통해 설명될 수 있는 대상으로 취급한다거나, 혹은 생리학적 접근에 따라 의식과 무관한 것으로서 분리하여 설명하는 것과 차이가 있다. Merleau-Ponty의 논의에 기반하여 학습을 바라본다면, 학습은 분리되어 있는 객체에 대한 습득이 아니라 몸을 매개로 하여 시·공간 속에서의 학습의 대상에 대한 지각에 기반한 유기적인 상호작용으로 이해될 수 있다.

‘앎’에 대한 Heidegger의 활동 개념이나 Merleau-Ponty의 몸-주체 개념을 토대로, 인식적 차원을 넘어 존재 방식으로서의 이해와 지식을 과학 학습에 적용하면, 과학을 배운다는 것은 교과서에 적혀 있는 언어화된 이론과 법칙을 암기하는 것으로 환원되지 않는다. 과학을 배운다는 것은 알게 된다는 뜻이고, 안다는 것은 단순히 명시적인 인식론적 앎이 아닌 과학을 행하는 형식과 내용을 체득(體得)하는 것이다. 과학의 이론과 법칙 등의 언어적인 명시적 앎을 넘어서 과학을 하는 것과 관련된 적절한 사용방식, 즉 과학의 태도와 방식을 안다는 것을 의미한다. 구체적으로, 과학 활동에 참여하는 방식, 과학 도구를 다루는 방식, 현상을 만들어내고 자료를 다루는 방식, 증거와 주장에 대해 의사소통을 하고 반박을 대하는 방식, 과학의 규칙(규범)을 지키는 방식 등의 실제 과학 현장에서 드러나는 존재적 방식을 의미하는 것이다. 과학에 관한 명시적인 앎, 즉 언어 중심의 인식의 방식으로서 앎은 아주 부분적이고, 과학을 수행하는 앎의 대부분은 몸이 참여하는 존재적이며 암묵적인 차원에 놓여 있다. 따라서, 과학 혹은 과학학습에 대한 관점 역시 인식적인 과정을 포

함한 실천적이고 활동적인 관점까지 포함하는 것으로 확대할 수 있게 된다.

### III. 과학적 실행의 단위로서 모델링

이 장에서는 과학적 실행의 복잡성과 비선형성의 과정으로서 명시적이고 암묵적 지식의 작동이 이루어지는 단위(unit)로서 과학적 모델링을 조명하고자 한다. 그동안 과학교육에서 다루었던 구조화된 방식의 모델링이 이론 확인에 과도한 중점을 두었다는 점에 주목하고, 이론과 모델의 관계 검토를 통해 모델링을 이론과 현상을 매개하거나 혹은 자율적으로 구성되고 이론을 참조하며 조정하는 것으로서 의미화하고, 특정 맥락과 현상에 따라 명시적 지식과 암묵적 지식의 교직으로 전개되며 닫힌 동시에 열린 방식의 모델링을 제시하고자 한다.

#### 1. 단순화된/구조화된 도구적 모델링

과학에서 모델링은 연구자마다 조금씩 그 의미가 다르게 사용되었는데, 모델링의 의미는 19세기 초반에서부터 현재에 이르기까지 변화를 겪어왔다(Bailer-Jones, 2009). 19세기 이론이 세계의 탈맥락적/보편적 법칙을 추구한다면, 세계의 일부에 대한 구체적/맥락적 문제를 설명하기 위해 작동하는 것은 모델이 된다. 대체로 과학교육에서 사용된 모델링은 과학 교수·학습 방략으로서 19세기 모델링 관점을 반영한다. 구체적으로는 이론에서 연역된 것으로서 이론 검증을 위한 단순화된/구조화된 비유나 예시(아날로그 모델) 모델 사용을 뜻한다.

애초에 과학적 모델은 기계적인 것으로서 흔히 유비(analogy)와 구별되지 않고 사용되었다(Bailer-Jones, 2009). 19세기 말 물리학이 점차 추상화됨에 따라 기계적 모델이 적합하지 않게 되어 유비를 넘어서는 모델의 의미가 요구되었다. 20세기 초반 빈 학파(Vienna Circle)의 초기 과학철학자들은 논리 경험주의를 형성하였고, 이론의 정당화 문제에 골몰했으며, 따라서 모델을 이론으로부터 연역된 명제들의 목록으로 이해하였다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이, 학습해야 할 논리 영역의 이론이나 개념이 규정되고(상위), 그 이론이나 개념에 해당하는 예시가 경험 영역의 모델(하위)로서 제시되는 것이다. 대체로 과학 이론의 핵심으로 여겨지던 법칙과 같은 것들에게서

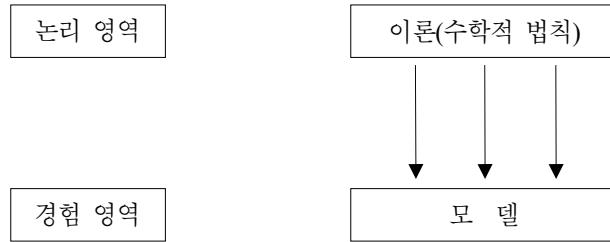


Fig. 1. Models from a logical empiricist perspective

연역(Fig. 1의 화살표)되는 모델은 그 법칙을 검증해 주는 대표적인 예시로 사용된다.

학교 과학에서 다루어지는 전형적인 모델은 Fig. 1의 논리 경험주의 관점에서 이론과 모델을 바라보는 관점과 닮아있다. 예를 들어, 뉴턴 역학의  $F=ma$  법칙에 해당되는 사례로서 ‘단순 조화 진동자’라는 모델은 뉴턴 역학으로부터 연역된 사례이다. 또 다른 예로, 우리가 학생들에게 수레에 작용하는 힘과 가속도의 관계를 탐구하게 했을 때, 우리는 ‘힘’과 ‘가속도’라는 과학 개념이 무엇을 의미하는지 구체적인 예를 제시하며 보여주고 있는 것이다. 이처럼, 추상적인 법칙으로부터 연역된 구체화된 사례로서 모델은 법칙을 확인시켜 주는 도구적 역할을 한다.

대표적인 실험·실습 방략으로서 이론/개념에 대한 구체적인 지시물(예, 예시나 비유 모델)을 학생들에게 함께 소개하는 이유는 특정한 과학 개념을 이론적 관점에서 설명하기보다는 실제 사물을 동원하면서 의사소통하는 것이 원활한 의사소통에 더욱 효과적이기 때문이다. 이것은 Wittgenstein(1953)이 ‘실물지시적 정의(ostensive definition)’라고 부른, 직접 보여주기(ostension)를 통한 지도라고 볼 수 있다. 이때, 학생들은 형식적인 정의나 언어적 설명에 의해서가 아니라 예시를 이해함으로써 새로운 개념을 더욱 수월하게 학습할 수 있으며, Kuhn(1970) 역시 많은 경우 학습은 이러한 경로를 따른다고 지적한 바 있다. 즉, 이러한 논리 경험주의에 기반한 기존의 과학 교수·학습 접근은 학생들에게 현상을 바라보는 특별한 모델을 사용하여 ‘이것을 이런 식으로 보라’고 요청하는 것이다(Millar, 1998).

이론/개념에 대한 예시는 교과서 활동의 15% 정도가 아날로그 모델로 등장한다(Chinn & Malhotra, 2002). 아날로그 모델은 실제 상황을 표상하기 위해

고안된 것으로서 단순화된 물리적 모델을 의미한다(Chinn & Malhotra, 2002). 예를 들어, 학생들은 침전 과정을 조사하기 위해 자갈, 작은 자갈, 모래, 흙, 물을 항아리에 넣는다. 항아리 내부의 과정은 호수나 바다에서 일어나는 과정과 유사하다고 가정한다. 예시나 아날로그 모델의 사용은 가르치기 위한 내용 지식을 지도 목적에 맞게 변형하는 과정을 거쳐 탄생한 것이다. 그 과정에는 과학 모델을 학생들에게 도입하기 위해 복잡성의 수준을 결정하는 것이 포함된다. 과학자들이 설명을 구성하기 위해 만든 스케일 모델(예, DNA 이중나선 모델), 비유 모델(예, 전압의 물탱크-수압 모델), 혹은 사례(예, 진자 모델)가 이에 해당한다. 이들 모델은 설명하고자 하는 목적을 위해 특정 변인을 고정한, 즉 조건이 주어졌을 때 이상적인 조건의 고정된 상황에서 작동한다. 실제 세계, 즉 복잡계의 구체성을 떠났지만, 몇 가지 구체적 조건을 만족시키는 정도로 구체적이면서 동시에 이론에 의존한 추상적인 성격을 갖는 모델이다. 즉, 이론에서 연역되거나 이론에 잘 부합하는 모델이 된다. 과학교육에서 모델은 대체로 이런 의미로 이해되고 사용되기 때문에 모델을 다루는 활동을 통해 지식이 생성된다고 여겨진다. 조건화된 상황을 다루면서 실제 활동과 분리되고 조건화된 모델을 일종의 증거로서 다루는 지식/개념 주장의 단순화된 인과관계의 틀을 따른다.

이렇듯 학교 과학이 단순화된 인과관계를 다룰 때, 학교 과학은 알고리즘적인 추론 전략을 사용하며 그 자체로 충분하다고 여겨지기 쉽다(Chinn & Malhotra, 2002). 예를 들어, (a) 요인 X를 제외한 모든 변수가 통제되고 결과에 차이가 있으면 X가 인과적이라고 결론을 내린다. (b) 요인 X를 제외한 모든 변수가 통제되고 결과에 차이가 없으면 X가 인

과관계가 아니라고 결론을 내린다. (c) 실험이 적절하게 통제되지 않으면 결과가 불확실하다고 결론을 내린다. 하지만, 실제 실험 모델과 단순 실험 모델의 분명한 차이점은 실제 실험 모델은 각 조건에서 초기 사건과 최종 사건 사이에 여러 다양한 사건들이 접맥되어 있는 반면, 단순 실험 모델은 초기 사건과 최종 사건만 있다는 것이다. 초기 사건과 최종 사건의 관계를 쉽게 프로그래밍할 수 있는 간단한 추론과 달리, 실제 과학적 모델링에서의 추론은 불확실한 판단과 발견을 포함한다. 이때, 불확실한 판단과 발견은 광범위한 오류 가능한 휴리스틱(heuristic)을 사용해야 한다. 실험의 복잡한 모델링은 모든 사건에 대한 대체 원인을 거의 배제할 수 없기 때문에 실제 실험에 대한 추론은 알고리즘적일 수 없는 것이다.

살펴본 것처럼, 학교 과학의 구조화된 모델링은 이론으로부터 연역된 전형적 현상을 다루기 때문에 단순 인과관계로 구도화된 실험을 수행하지만, 실제 과학적 실험은 현상을 만들어내는 과정과 현상에서 증거가 되어가는 과정의 그 긴 복잡성과 비선형성을 다루기 때문에 기계적 관점의 모델링으로 처리될 수 없다. 게다가, 단순 인과 관계만을 고려하는 구조화된 모델링의 경우, 긴 활동 과정에서 개입하는 비언어적인 ‘감식력(connoisseurship)’, ‘숨씨(skills)’, 혹은 ‘판단’과 같은 암묵적 차원의 지식은 간과된다(김관영 등, 2022a). 이론과 같은 명시적 지식만이 전면에 등장하게 되어 활동은 선형적으로 이루어지고 학생들은 그 과정이 잘못되더라도 이론을 의심하지 않는다. 절차적 과정을 잘 수행하면 어떤 이론을 검증하는가에 대한 추론은 교과서나 교사에 의해 제시되기 때문이다. 단순 탐구 과제에서의 과학적 추론은 단순하고 확실하고 알고리즘적이어서, 표면적 관찰 수준에 초점을 맞춘 것으로 간주되는 비과학적 인식론을 조장할 수 있다(e.g., Carey *et al.*, 1989). 따라서, 학교 과학은 이론을 잘 설명할 수 있는 좋은 예시, 즉, 효과적인 설명을 위한 도구로서 모델을 사용하는 것에서 벗어나, 실제 과학의 실험의 복잡한 과정을 담아내는 활동의 단위로서 과학적 모델링을 다룰 것이 요구된다.

## 2. 모델과 이론의 관계: 구조화된 혹은 비구조화된 모델링

모델의 용어는 맥락에 따라 가지는 의미가 다양하며(Gilbert *et al.*, 2000; Holloun, 2006) 그 다양성에

관해서는 과학교육에서 충분히 논의되었다고 보는 의견도 있지만(정용욱, 2014), 모델과 이론의 관계, 그리고 모델링 프로세스의 복잡성과 비선형성에 대한 논의는 충분하지 못하다(Pierson & Clark, 2019). 앞 절에서 살펴본 것처럼, 19세기 말까지 물리학과 수학에서 단순성의 철학을 내세운 기계론적인 관점에서 모델링은 이론으로부터 연역된 전형적인 예시를 설명하는 것으로서의 도구적 위상을 가졌다. 이러한 모델과 모델링에 대한 기계론적 관점은 모델과 이론의 관계를 비판적으로 검토함으로써 새롭게 조명해 볼 수 있는데, Bailer-Jones(2009)가 물리학, 화학, 생물학에 걸쳐 연구에 종사하는 과학자들과의 면담에서 밝혀낸 모델의 특징으로부터 그 논의를 시작해 볼 수 있다.

- (1) 모델은 오늘날의 과학 활동에 중심적인 것으로 인정받고 있다.
- (2) 이론은 모델보다 더 근본적이고 일반적인 것으로 보는 경향이 있는 반면, 모델은 이론으로부터 끌어낼 수 있고, 따라서 이론이 특정 현상을 모델링하는 데 어떻게 기여하는지를 보여준다.
- (3) 모델이 통찰력을 제공하고 자연계에 대한 우리의 이해에 기여한다는 인식이 있다.
- (4) 모델은 사물을 단순화하여 어떤 것의 본질을 포착하려고 노력하는 반면, 모델링된 현상에 대한 덜 본질적인 세부 사항들은 생략한다.
- (5) 모델은 제한된 유효성을 가질 수 있으며, 이는 다른 모델이 다른 기능을 수행할 수 있음을 의미한다. 그래서 모델은 “맞다”는 것을 알지 못하거나 심지어 그것이 옳지 않다고 알려졌을 때도 유용할 수 있다.
- (6) 모델은 이용 가능한 경험적 자료와 일치해야 할 뿐만 아니라 예측을 유발해야 하며 그러한 방법은 시험할 수 있어야 한다.

위 문장들에 따르면, 현장의 과학자들이 이해하는 모델은 과학 활동의 중심(1)으로서 사물을 단순화하여 특정 사항을 본질적인 사항은 부각하고 덜 본질적인 사항은 생략하기 때문에(4) 가용한 경험적 자료와 일치하고 검증 가능해야 하며(6) 제한된 유효성을 가지며(5) 자연계에 대한 우리의 이해에 기여한다(3). 요약하면, 모델링은 복잡한 실세계의 일

부를 단순하게 초점화함을 필연적으로 수반하므로, 모델이 실재를 있는 그대로 반영하는 것이 아니라 식별 가능한 실재계는 명시된 측면(aspect)과 정도(degree)로 모델과 근사(approximation)하다고 이해된다(이종봉, 2018).

이상, 과학자들이 이해하는 모델에 대한 생각은 최근 과학철학에서 전개된 모델의 의미와 역할과 유사하다. Suppes, Giere, 그리고 van Fraassen과 같은 과학철학자들이 과학 이론을 모델들의 집합으로 바라보면서 과학에서 모델의 의미와 역할이 크게 부각되었다(Nagel, 1960). 또 Giere *et al.* (2006)에 따르면, 이론은 세계와 직접 대면하지 않으며 모델이 세계의 특정 부분을 표상하므로, 모델들과 그 모델들이 세계를 설명하는 진술인 가설들의 집합을 이론으로 간주했다. 즉, 과학적 실행에서 모델은 이론의 도구나 이론으로부터 연역된 것이 아닌, 구체적 현상을 설명하기 위한 것으로 격상되었으며, 이론은 모델을 해석하기 위해 작용하는 것으로 이해되었다(Fig. 2 참조).

살펴본 것처럼, 과학자들이 생각하는 모델의 특징에 따르면 이론은 일반적인 차원에 있고 모델은 사물이나 경험적 자료를 다루는 구체적인 차원에 있으며, 이론은 더 근본적인 반면 모델은 옳고 그름을 떠나 이론을 구체화하는 역할을 하는 것으로 그 관계를 규정하는 경향이 있다. 이처럼 모델의 의미는 과학자들 사이에서 일견 동의가 이루어진 것처럼 보이지만, 그럼에도 불구하고 이론과의 관계에서 모델의 위상은 다소 불분명하고 모호한 구석이 있다. ‘이론은 모델보다 더 근본적이고 일반적인 것으로 보는 경향이 있는 반면, 모델은 이론으로부터 끌어낼 수 있고 따라서 이론이 특정 현상을 모델링하는 데 어떻게 기여하는지를 보여준다(2)’는 것은 이론은 보편적이고 모델은 구체적이며, 모델은 이론으로부터 연역된다는 위계적 의미를 담고 있다. 그와

달리, 모델이 통찰력을 제공하고 자연계에 대한 우리의 이해에 기여한다는 인식이 있다(3)는 것은 모델 자체가 갖는 지식(이해) 생성의 잠재성과 가치적 차원을 엿볼 수 있으며, 이것은 이론과의 관계에서 부분적으로 독립되어 작동하는 모델의 의미와 역할을 함축한다.

모델은 세계의 특징 일부를 과장하거나 축소하면서 작동하므로, 하나의 연속적인 모델은 없으며 여러 모델의 다중 표상이 다층적으로 겹치거나 소멸되기도 한다. 더 나아가 모델의 발견적 속성과 창조적 속성 등이 주목되면서 모델의 의미가 확장되었다(Hesse, 1963). 과학적 실행은 이론에 없는 것들이 실험에서 나오는 것(O’Hara & Pricha, 1987)을 포괄하기 때문에, 이론과 모델의 관계에 대한 비유는 위계적인 관계로 머무르는데 한계가 있다고 보는 것이다. 모델링의 자율적(autonomous) 성격은 이론으로부터 고립된 것의 의미가 아니라, 이론에서 연역된 모델링과 달리 꾸준히 이론을 모색하고 제휴되는 역동적 과정을 강조한다(Morgan & Morrison, 1999). 모델링은 명시적 형태가 아니라 동사적 형태이므로 명시적 지식의 기술(description)뿐 아니라 암묵적 지식이 얽혀 작동되는 것으로 보아야 한다. 즉, 앞서 살펴보았던 지식관에 비추어보았을 때, 모델링의 과정에는 명시적인 지식뿐만 아니라 말로 표현할 수 없는 암묵적인 지식 역시 복잡하게 연결되어 있는 것으로 바라보아야 할 것이다.

모델과 이론의 관계를 통해, 모델링은 이론 연역적인 구조화된 모델링으로부터 이론으로부터 일부 자율적인 비구조화된 모델링의 스펙트럼을 갖다고 볼 수 있다. 앞서 제시했듯이 구조화된 모델링은 이론을 확인하기 위한 전형적인 모델을 지향하는 반면, 비구조화된 모델링에서 “핵심(substance)”은 “이전 실행의 결과이자 후속 작업의 소스(both the sedimented outcome of earlier action, and the source of

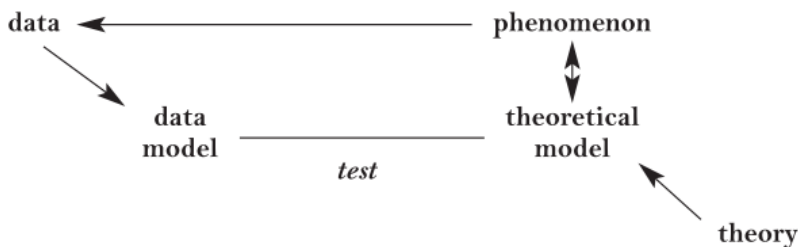


Fig. 2. Phenomenon, data, and models (Bailer-Jones, 2009)

subsequent action)”(Goodwin, 2017, p. 32)로서 그 구조를 담고 여는 유동적 과정이며, 따라서 핵심(substance)으로서 결절된 모델은 실행의 과정에서 역동적으로 변화한다. 구조화된 모델링에서 모델은 여전히 언어를 위시한 기호로 표상되므로 그 과정에 개입하는 비언어적인 암묵적 지식은 고려되지 않는다. 모델 및 모델링에 관한 과학교육 연구에서 연구자들은 흔히 학생들이 모델링의 과정을 거쳐 모델을 구성-평가-재구성한다고 전제하고 그 과정에서 영향을 미친 요소들을 분석한다(강은희 등, 2012; 김지운 등, 2016; 박희경 등, 2016; 양찬호 등, 2016; 이신영 등, 2012; 이차은과 김희백, 2016; Mendonça & Justi, 2011; Passmore & Svoboda, 2012; Rea-Ramirez *et al.*, 2008). 그러나 그 요소들은 이미 교육적으로 기표화되어 있는 것들이어서 실제로 학생들의 모델링에서 작동하는 비언어적인 암묵적 차원은 그다지 주목받지 못한다. 반면, 비구조화된 모델링에서는 불확실하고 복잡하고 이질적 경로를 갖기 때문에 현상을 구체화하거나 데이터를 증거화하는 과정은 길고 다양하고 순환적으로 발생하여 쉽고 명확한 언어로 명시되기 어렵다(김관영 등, 2022a). 이론으로부터 모델을 연역하여 전형적인 현상을 만들어내는 것뿐 아니라 이론으로부터 부분적으로 독립되어 발생하는 모델링의 길고 다양한 양상을 주목한다면, 모델링이라는 수행성(performativity)은 몸으로 직접 시행착오를 거쳐 경험을 통해 체화되는 암묵적 지식인 숙련과 솜씨 등이 중요한 역할을 하며 실행의 매순간 발생하는 조금씩의 진행과 즉각적인 반응들(piecemeal and ad hoc justifications)(Lynch, 1985)을 통과하는 것에 주목해야 한다. 이처럼 실행의 세세한 흐름은 언어화되지 못한 채 간과되기 일쑤이며, 체화된 암묵적 지식은 공식화하기 힘들고 명시적으로 전달되기 어렵다(Polany, 1958, 1969). 따라서, 과학적 실행으로서 모델링에 작동하는 일상의 사고방식으로부터 체화된 암묵적 지식의 속성과 기능에도 주목해야 할 것이며, 그 과정을 통과하여 결절되는 모델의 비결정적인 다양한 양상에도 가치를 부여해야 할 것이다. 이를 테면, 이론이 포착해내지 못하는 현상이 창출되는 경우 모델링은 반드시 이론으로부터 나온다고 말하기 어려우며, 새로운 문제제기, 현상의 반복적 창출과 다른 출처로부터 얻은 이론의 참조가 얹혀 진행된다(유금복 등, 2022). 또는 문제 상황이나 현상 창출 초기에 이론이나 개념의 연관

이 불확실한 채로 모델링이 촉발되지만, 여러 가능한 이론(개념)의 붙임과 떼어냄 등의 지속적 탐색과 참조의 과정은 모델링의 역동성을 보여준다(김관영 등, 2022b).

### 3. 비구조화된 모델링의 다양한 양상

단순화된 인과관계를 중심으로 진행되어 온 학교 과학 탐구실험과 달리, 과학적 실행은 많은 변수가 얽혀 돌아가는 복잡계로서 초기조건에 따라 복잡다기한 사건들로 발전해가며 닫고 열어가는 시스템이다. 과학적 실행은 실험, 조사, 현장연구 등 다양한 맥락에서 수행되고, 그 과정도 일률적으로 이야기할 수 없을 정도로 일시적인 행위부터 안정적인 장기 활동에 이르기까지 다양하다(Rouse, 2007). 학생들의 과학적 실행도 마찬가지로 고정된 선형 경로를 나타내지 않으며 맥락에 의존적일뿐 아니라 학습의 비선형 궤적을 보이는 복잡한 과정으로 보고되고 있어, 실행-중심 과학 교수·학습은 그 복잡성과 비선형성을 반영하는 실행의 중심에 모델링이 있다고 본다(Pierson & Clark, 2019). 이때 모델링은 다른 실행들(Table 1 참조)과 중첩되면서 그 중심에 위치하고 있는 것으로 간주된다.

Giere(2018)가 제시한 모델의 구조(Fig. 3 참조)는 과학자 실행의 단위로서 모델링의 다양성을 보여준다(김관영 등, 2022a). 이론적 모델은 원리 모델(principled models), 표상 모델(representational models) 등을 포괄하며, 원리 모델은 기존의 경험적 정보나 수학적·통계적 기법을 통해 실제 시스템과 관련된 모델인 표상 모델로 점차 구체화되고, 궁극적으로는 데이터 모델과 비교할 수 있는 수준으로 구체화된다. 모델의 구조에서 또 다른 주요 요소는 바로 실험 모델이다. 실험 모델은 어떤 현상에 대한 데이터 모델을 얻기 위해서 필요한 모델이다. 즉, 실험 모델을 통해 데이터 모델이 구성된다. 구체화된 표상 모델을 검증하기 위해서는 데이터 모델이 요구되는데 실험 모델은 그러한 데이터 모델을 구성하며, 생성된 데이터 모델을 이해하는 데 중요하다. 실험 모델이 구체적 문제를 해결하기 위한 상황에서 과학자가 도구를 매개로 데이터를 얻는 것이라면(김관영 등, 2022a), 데이터 모델은 그 과정에서 얻은 데이터의 의미를 구성한 것이다(김관영 등, 2022b). 이처럼 모델링은 문제 상황에 구속되어 구체적 영역 내에서 작동하며, 그 목표의 중심이 어디에 집중되느냐에 따라 이

론(설명), 실험, 혹은 데이터 모델이 된다.

실험의 복잡성과 비선형성을 지닌 역동적 과정으로서 모델링은 ‘특정 현상/사건에 대한 문제를 해결하는 과정’(Bailer-Jones, 2009)으로 정의되며, 특정 현상 혹은 사건, 즉 해결해야 하는 문제 상황에 따라 그 강조점이 달라질 수 있다. Fig. 3은 모델링은 문제 상황에 따라 이론적 모델링, 실험 모델링, 데이터 모델링 등으로 범주화할 수 있으며 상호 연관된다는 것을 보여준다.

### 1) 실험 및 데이터 모델링

과학적 실험에서는 과학자든 학습자든 단일하지 않고 이질적이고 다양한 경로를 갖게 된다(Pierson et al., 2017). 따라서 세계의 일부를 이해하기 위해 맥락에 따라 다양하고 중층적 양상을 갖는 과학자의 역동적인 활동과정으로서의 모델링은 구체적 활동 속에서 확인되는 경험의 세세한 흐름을 포함한다. 과학자가 ‘해 내는’ 모델링의 구체성과 복잡성은 이론이나 법칙의 도식으로 정리된 단순함으로써 간결하게 잡아낼 수 없다. 과학적 모델링의 구체적 실상은 몹시 복잡하여 그 진면목은 실로 그 ‘환원할 수 없는 복잡성’(irreducible complexity)(김영민, 1994)에서 발견된다.

김관영 등(2022a, 2022b)에 따르면, 실험 모델링과 데이터 모델링은 상호 중첩되고 그 양상은 맥락적이고 비언어적인 암묵적 지식이 매우 중요하게 작

동하며 학교 과학 탐구에서 지나치기 쉬운 암묵적 지식의 발현과 조금씩 진행되는 학습의 면모를 찾을 수 있다. 특히, 실험 모델을 현상을 이해하기 위하여 표상 모델을 검증하고 자료를 구성하는 모델로 정의할 수 있으며(Bailer-Jones, 2009), 이러한 현상 모델을 형성하고 이를 통하여 자료 모델을 생성하고 이를 이해하는 과정을 실험 모델링으로 바라본다(김관영 등, 2022a). 이러한 실험 모델링 과정을 물질(material), 행위자(agential), 계산(computational)의 구성 요소들(components)이 협력적으로 작동하는 것으로 보고 학생들의 실험 모델링을 해석한 결과, 모델링 초기에 학생들은 도구에 익숙해지는 비언어적인 활동을 하고 그 활동이 충분히 이루어졌을 때 언어적인 양적 기호가 창출되었다는 점, 창출된 양적 기호는 이후 활동에서 참고할 수 있는 데이터와 자신감의 원천이 되었다는 점, 그리고 도구의 전용화가 발생하였으며, 변인통제와 같이 기존의 과학 탐구에서 중요하게 다룬 요소들이 나타났다고 보고 하였다.

또한, 데이터 모델링은 과학자의 연구 과정에서 원 데이터(rawdata)를 표준화하는(canonicalform)하는 과정을 거쳐 생성된 모델(Bailer-Jones, 2009)로 정의할 수 있으며, 이러한 데이터 모델을 생성하고, 변화하며 해석하는 과정을 데이터 모델링으로 바라본다(김관영 등, 2022b). 또한, 관련된 연구들에서 데이터 모델링은 현상을 생성하고 데이터가 증거화되는 과

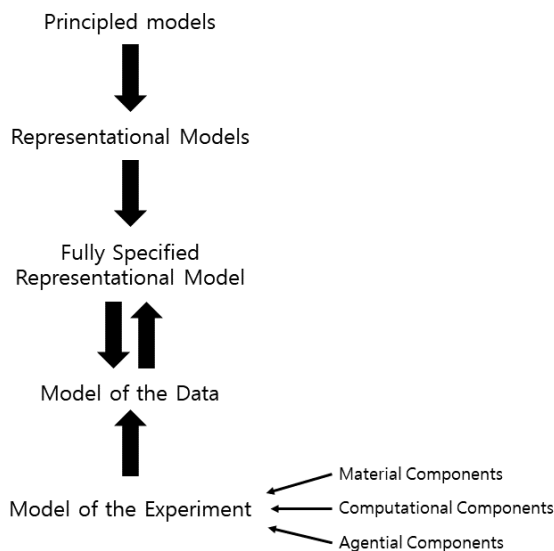


Fig. 3. A hierarchy of models (Giere, 2018; 김관영 등, 2022a 변형)

정에서 점차 실험 모델과 이론적 모델과의 상호관계 속에서 이루어지는 복잡하고 역동적인 양상을 보이는 것으로 보고되었다. 현상은 데이터 모델링 과정에서 생성되고 변화하며, 안정화되고, 또 데이터 모델링을 통해 현상이 되어가고 다양한 기입으로 변형되는 데이터 모델은 점차 증거로서 지위를 획득해 가는 순환하는 지시의 과정을 통과한다. 현상을 만들고 증거화되는 과정에서 암묵적 지식이 중요하게 작동하는데, 현상의 생성은 일회의 선형적 도구 조작으로 이루어지는 것이 아니고 복잡한 몸-주체의 도구 연관성에 달려 있으며, 현상의 조정과 안정화 과정을 조금씩의 조작의 변화 그리고 데이터의 판단과 해석 등에 있다. 데이터가 증거가 되어 가는 길고 비선형적 궤적을 갖는데, 과학자가 식별해내지 못하거나 의미를 해석하지 못하는 새로운 현상이 현출되는 경우, 현상을 안정화하고 증거화하는 모델링은 다른 출처로부터의 탐색과 참조를 통한 연관 과정을 순환적으로 거친다.

2) 설명 모델링

모델은 맥락적으로 결절되므로 그 존재는 드러남과 사라짐을 통해 입증된다. 세계의 일부, 즉 특정 현상에 대한 질문(question)이나 사건(event)을 해결하기 위해 활성화되는 과정이 모델링이고 그 모델링은 맥락화되어 있으므로 특정 실체로서의 모델의 작동을 의미하지는 않는다. 즉, 고정된 실체가 아니라 변화하는 과정으로서의 모델링을 뜻한다. 예로, ‘우리는 탁자 위에 있는 사과를 어떻게 보는 걸까?’라는 질문이 제기되면, A라는 초등학생은 ‘박쥐-음

파-시력’, ‘어둠-고양이-손전등’, ‘희미함-윤곽-영화관-지하실’ 등을 활성화하여 시각 작용에 대한 모델링을 작동한다(Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, 1997). A의 모델링은 면담자의 질문이 전개됨에 따라 선개념(preconception), 다양한 매체(책, 다큐멘터리 영상 등)를 통한 과거 경험, 여러 상황(어둠, 영화관, 지하실)에서 사물-동물(고양이, 손전등)과의 경험이 소환되고 연결되면서 작동한다. 질문에 따라 초점이 맥락적으로 조금씩 이동하면서 모델의 전경-후경의 선택이 달라지는데, 이것은 다중 모델링이 작동되며 맥락적 정합성을 찾아간다는 의미를 갖는다. 이때 질문, 맥락, 사건, 모델링은 사전에 예정된 것이거나 고정된 것이 아니라, 시간의 흐름에 따라 그 모습을 달리하면서 변화하거나 혹은 다시 회귀되어 새롭게 변주되는 것으로 보아야 한다. 또, 모델링은 현상과 이론을 매개하거나 혹은 자율적 행위자로서 작동하여(Morgan & Morrison, 1999) 새로운 이해를 도모하기도 한다.

다른 사례로, Fig. 4의 “책상 위에 놓인 책에 작용하는 힘을 골라보시오”라는 문제에 대해 중학교 1학년 학생들 중 가장 많은 빈도수는 A를 선택하였는데(강경희와 이선경, 2001), 그것은 공기 중 사방에서 책 뒤로 작용하는 힘이 화살표로 표시되어 있는 항목이다. 한 학생은 A를 선택한 이유에 대해, “공기에서 책으로 힘이 작용하기 때문에 책이 책상 위에 잘 놓여 있는 것이다. 공기가 책을 잘 누르고 있다. 공기가 누르는 힘이 없으면 책은 공기 중에 둥둥 떠다닐 것이다”라고 대답한다. 다른 학생은 중력 방향의 힘이 작용하는 B를 선택했고, “중력이 작용

문항1 책상 위에 책이 놓여 있다. 다음 중에서 책에 작용하는 ‘힘을 가장 잘 표현한 것은? (그림에서 화살표의 방향은 책에 작용하는 힘(들)의 방향을 나타내고, 화살표의 길이는 힘(들)의 크기를 나타낸다.)

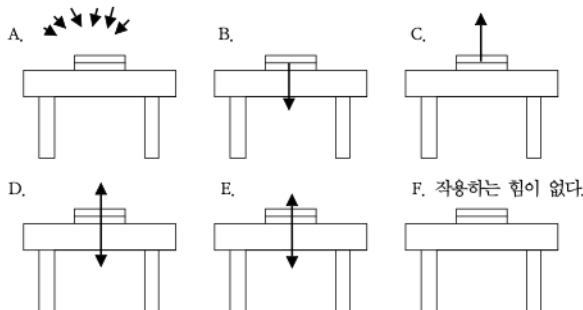


Fig. 4. Books on the table (강경희와 이선경, 2001)



해요. 중력은 지구가 잡아당기는 힘이고 중력 때문에 책이 책상 위에 있어요”라고 말하며 중력을 배웠다고 덧붙었다. 그 외에도 다양한 선택지가 존재했고 각 선택지에 따른 해명이 다양했다. “책상 위에 놓인 책에 작용하는 힘”이라는 특정 문제 상황에 놓여 학생들은 다양한 방식의 모델링을 작동시켰다고 볼 수 있다. 이것을 모델링이라고 하는 이유는 추가 질문을 하면 다른 요소들을 제거하거나 덧붙이면서 변화하는 상황에 적절한 해명을 늘어놓기 때문이다.

한 사건을 ‘이해’(understanding)하는 것은 사건이 촉발되는 지식 구조의 기억으로부터 나오는데(Schank & Abelson, 1977), 지식 구조의 기억은 스키마와 같은 전형적인 구조를 활성화하는 것이라는 인식론적 차원의 해석을 벗어나, 몸-주체의 기억인 암묵적 지식의 활성화를 통해 언어적 형태의 설명이 구성되는 것이다. 학교 과학에서 중력은 다양한 방식으로 학생들에게 제시될 것이다. 교과서에 기술되어 있는 문장 형태의 설명과 전형적 중력 현상/사례, 과학 탐구 실험으로 제시되는 중력 가속도 측정 실험, 교사의 언어-비언어적 내러티브 등이 제공될 것이다. 학생들에게 다소 낯설고 추상적이지만 일상에서 여러 매체 혹은 언어로 접해본 ‘중력’이라는 과학적 개념은 교과서와 교사가 제시하는 맥락에서 모델링된다. 예를 들어, 지구 위에 사람이 붙어있는 이유로서 중력을 모델링하기도 하고, 거꾸로 자유 낙하하는 엘리베이터에 있는 깃털에게는 중력이 작용하는가 하는 문제 상황에서 무중력을 모델링한다. 또, 자유 낙하하는 물체가 찍어내는 위치의 거리를 시간으로 나누고 루트를 씌우는 수학적 계산을 통해 중력 가속도를 측정한다. 모든 예시와 실험 맥락은 중력을 다양한 방식에서 배우기 위한 모델링 활동이며 그 실행에 활성화되는 모델링의 목적과 양상도 조금씩

다르다. 조금씩 다른 모델링은 조금씩 다른 맥락에 불박혀 작동하는 것이다. 따라서 이것이 일반적이고 정적인 ‘개념’과 달리, 구체성과 맥락성을 갖는 모델링의 역동성을 보여준다.

살펴본 것처럼, 모델링은 문제 상황에 불박여있고, 따라서 그 상황에 경계가 지워진다. 중력을 중심으로 만들어지는 모델은 자유 낙하 실험 상황에서는 중력가속도 양상으로 활성화되고, 책상 위의 책 상황에서는 상호작용적 힘의 양상으로 활성화된다. 즉, 어떤 상황에서는 상호작용으로, 다른 상황에서는 가속도로 상황지워지는 것이다. 이처럼 상황에 불박인 구체성(concreteness)은 과학 교수·학습에서 만들어지는 모델링의 특징이다. 따라서 모델은 계속 변화하는 모델링에 따라 그 모습(구성 요소, 범위 등)을 달리한다(Boumans, 1999). 특히, 모델을 구성하는 과정에서 데이터와의 직접적인 상호작용만을 주요하게 집중하였던 이전의 접근과는 다르게, Boumans(1999)가 제안한 바와 같이 모델링의 과정에는 이론적인 관념, 은유, 비유, 실증적인 데이터를 포함한 다양한 요소들이 관여하고 있으며(Fig. 5 참조), 이들이 맥락에 맞게 엮여서 하나의 모델을 구성해낸다. 앞서 언급했던 책상 위의 책에 작용하는 힘이 공기의 힘이라고 주장했던 학생은 처음에 “공기에서 책으로 힘이 작용하기 때문에 책이 책상 위에 잘 놓여 있는 것이다. 공기가 책을 잘 누르고 있다.”고 표현하는데, 이 언어적 표상에는 공기-책-힘-작용과 같은 공식적/명시적 언어뿐 아니라 “잘” “누르고” 등과 같은 은유적 표현과 더불어, 너무나도 당연하다는 단호한 눈빛과 표정 그리고 ‘누르는’ 행동의 손짓/몸짓이 함께 작용하여 청자를 설득하기 위해 노력한다. 설득이 잘 안되면, 공기 힘이 없는 상황을 재설정하여 “공기가 누르는 힘이 없으면 책은

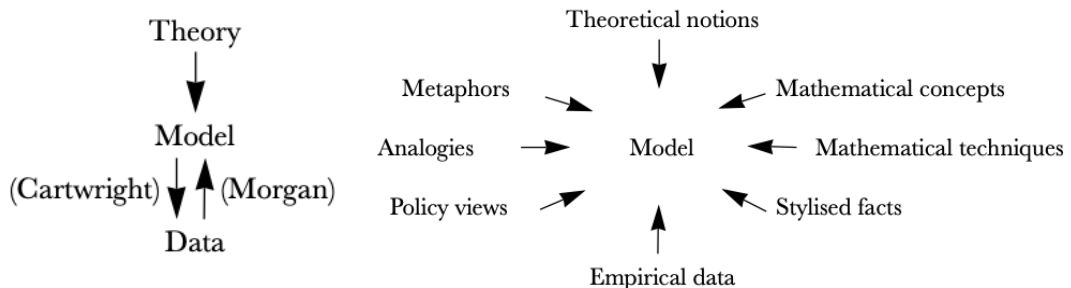


Fig. 5. Theory-model-data & components of the model (Boumans, 1999)

공기 중에 똥똥 떠다닐 것이다”라고 한다. 이때도 “힘”이라는 비물질적인 것을 “없다”는 물질적인 것에 은유하는 “없으면”이 사용되거나, “책”의 위치에 대해 자발적 움직임을 나타내는 “똥똥 떠다닐 것”과 같은 은유적 표현이 동반된다. 이처럼 학생들은 설명 모델링에서 새로운 현상에 부딪혔을 때 그것을 직접 서술할 적절한 용어를 갖고 있지 못하기 때문에 이미 가지고 있는 표현들을 은유적으로 사용(Lakoff & Johnson, 1980)하게 된다.

살펴본 것처럼, 학생들의 설명 모델링은 언어적/명시적 지식에 국한되지 않는다. 이는 목표 모델이 언어적/명시적 지식으로 이루어진 설명을 추구하더라도, 그 설명에 이르는 과정은 몸-주체의 기억인 개인적(personal) 지식이 활성화되는 것이다. 모델링에서 이론은 연관되며 참조되는 과정에서도, 이해하는 당사자의 인격적 지식, 다시 말해 암묵적 지식이 이론(명시적 지식)을 참조하거나 결합하거나 조율하여 이해를 추구하게 된다. 이론만으로 복잡한 현상/사건/맥락은 이해되지 않는 경우가 많으며, 따라서 학생은 처음부터 중력이라는 개념으로 설명하지 않는 것이다. 즉, 중력이라는 개념 없이 책상 위의 책에 작용하는 힘을 설명하다가 자신의 해석과 정합적인 순간/상황에 중력을 끌어와 설명을 구성한다. 또한 교과서에 제시된 명시적 설명과 사례 풀이, 탐구 실험, 교사의 개인적 지식이 활성화된 내러티브 등 다각적 모델링의 제시와 그에 따른 학생의 경험/체험 혹은 몸-주체의 경험이 모델링의 핵심이 된다.

#### IV. 결론 및 제언

본 연구는 실행-기반의 과학교육을 재고하기 위하여, 과학적 실행은 무엇이며 이것이 어떻게 작동하는가를 이해하고 더 나아가 실행의 단위로서 과학적 모델링의 의미를 논의하였다. 이를 위하여, 1) 과학적 실행은 무엇이며, 이때 지식은 어떤 특징을 가지는가?, 2) 과학적 실행은 어떻게 작동하는가? 라는 질문을 출발로 하여 언어 중심의 지식관을 재고하고, 과학적 실행과 과학적 모델링 사이의 연관성을 탐색하였다.

연구 결과, 우선 과학적 ‘실행’이 갖는 복잡성과 비선형성에 주목하면서 과학적 지식을 활동이나 행동 그 자체로서 바라보았다. 과학적 지식에 대한 관점을 언어가 중심이 되는 명시적 차원을 넘어서 숨

씨와 감식력 그리고 판단을 포괄하는 암묵적 차원으로 확장하였다. 과학의 실증주의적 관점은 탐구의 본질을 증거-이론 구도로 단순화하였고, 그 결과 실제 작동하는 과학적 실행의 복잡성과 이질적 경로를 무시해 왔다. 그러나 실제로 과학적 실행에서 현상을 창조하고 안정화하는 과정은 결코 선형적으로 이루어지지 않으며, 증거화되는 과정 또한 단순하지 않다. 게다가 증거와 이론의 관계는 일방향이 아닌 상호 순환적으로 복잡하게 관계를 맺는 일련의 과정이다. 요컨대, 복잡성과 비선형성은 현상과 증거를 만들고, 증거에서 설명으로 나아가는 과학적 실행의 고유한 특성이라고 정리할 수 있다. 따라서 과학적 실행의 복잡성과 이질적 경로에 작동하는 지식의 형식과 내용은 명시적 지식뿐 아니라 암묵적 지식을 포괄해야 한다는 주장으로 이어진다. 명시적 지식이 만들어지는 복잡하고 비선형적인 과정에 말할 수 없는 암묵적 지식이 관여하고 작동하는 것이다. 이처럼 지식관을 확장하는 과정은 Polanyi의 인격적 지식과 Oakeshott의 판단 영역의 지식을 토대로 검토되었다. 그 결과 이들의 지식관이 암묵적 지식이 명시적 지식의 기반이 이루고 있으며, 과학적 실행은 대부분이 암묵적 차원으로 이루어지고 일부분이 언어적 명제로 드러나는 것을 뒷받침할 수 있음을 발견하였다.

다음으로, 과학적 실행의 복잡성과 비선형적 역동성을 담아내는 단위로서 과학적 모델링의 의미와 역할을 논의하였다. 특히, 과학적 모델링이 특정한 목적과 맥락 속에서 구체적으로 작동한다는 점에 초점을 맞추어 모델링의 다양한 스펙트럼을 조망하였다. 19세기 기계론적 관점에서 모델링은 이론에 의존하는 것으로 이해되었지만, 과학적 실행으로서의 모델링은 현상의 구체성을 규명하는 과정에 구속된다. 현상/사건의 ‘붙어있는 복잡성’의 면밀한 흐름(flux)을 떼어내어 임의로 조작한 도식에 따른다면 ‘현상은 어떻게 생성되는지’ 혹은 ‘증거가 무엇인지’에 관한 답은 간단할 수밖에 없다. 따라서, 특정 상황을 분절한 교과서의 과학 탐구 문제는 구체적인 실세계의 복잡성과 중층적 관계성을 제거하게 된다(김영민, 1994). 하지만 그보다는 문제 해결을 위해 맥락의 현상 혹은 사건을 다루는 모델링의 관점에서 과학적 실행의 복잡성과 비선형성을 조망하고, 그 과정의 세세한 흐름과 결절을 암묵적 지식의 관점에서 섬세하게 다루어야 한다. 명시적 차원에서

암묵적 차원으로 확장한 과학적 지식관을 토대로, 과학적 실행으로서의 학습을 규정하고 과학적 실행의 핵심으로서의 모델링을 정리하는 것은 ‘과학을 배운다’는 것은 ‘알게 된다’는 뜻하게 된다. 이때 안다는 것은 단순히 명시적인 인식론적 앎이 아닌 과학을 행하는 형식과 내용을 체득하는 것이다. 과학에 관한 명시적인 앎, 즉 인식의 방식으로 앎은 아주 부분적이고, 과학을 수행하는 앎의 대부분은 암묵적인 차원에 놓여 있다. 앎의 거대한 암묵적 차원으로부터 명시적 앎이 구성되는 것이라 할 수 있다.

과학적 모델링은 구체적 상황/현상/사건을 이해하기 위해 작동하는 것으로서 언어적인 차원인 명시적 지식뿐 아니라 비언어적 차원인 암묵적 지식을 포괄하는 역동적 변화 양상을 갖는다. 따라서 문제의 맥락(상황)에 따라 모델링이 다양하고 중층적으로 작동하며, 가령 설명/이론 모델링, 실험 모델링, 데이터 모델링으로 조직된다. 각 모델링은 상호 연관되어 있어서, 특정 목적과 상황에 따라 전경이 되거나 배경이 되는 모델링이 있고 그 나타남과 사라짐에 따라 존재한다. 따라서 모델링 자체가 교육의 목적이 되기보다는 과학적 실행의 목적에 따라 다양한 위상의 모델링을 작동시키는 것을 의미한다. 과학 교수·학습으로서 모델링의 스펙트럼은 논리경험주의 관점의 단순화된/구조화된 모델링으로부터 비구조화된 모델링에 걸쳐 있다. 과학적 실행의 복잡성과 비선형적 궤적을 비구조화된 모델링은 시간성에 따라 모델은 계속 변화하는 상황에 따라 그 구조와 구성요소 및 범위를 달리하며 구성해가는 것을 의미한다. 즉, 비구조화된 모델링의 실체는 복잡성과 비선형적으로 작동한다. 즉, 모델링이 표상, 지식, 설명 모델 등을 목표로 하는 인식적 실행을 넘어서 활동 자체에서 그 맥락에 따라 필요한 밑천(resources)들이 연결되고 끊어지고 다시 새롭게 구성되는 역동적 과정으로 이해된다면, 과학교육에서 모델링

연구는 기존의 모델링 연구가 몇 가지 인지적 표지에 국한되어 이루어졌던 과학적 실행을 폭넓고 상세하게 이해하고 해석할 수 있게 된다.

이상에서 논의한 바와 같이, 실행-중심의 과학교육이 암묵적 지식관을 포괄하고 복잡성과 비선형성을 갖는 실행의 단위로서 모델링의 속성과 다양한 양상을 고려하면, 모델링을 단순히 이론에서 연역된 예시로서 다루거나 단순 인과관계의 구조화된 아날로그 모델을 작동하는 것을 넘어서 비구조화된 모델링으로 확장해야 할 것이다. 논의를 종합하여 실행-중심 과학 교수·학습을 위한 실천적 지침을 제안하면, 첫째 과학적 실행으로서 모델링은 그 구조가 닫히고 열리는 방식의 게임<sup>4)</sup>의 형식을 가져야 할 것이며, 둘째 모델링에 실패는 없고 조금씩의 시도와 진전이 있으며 더 많은 것을 배울 수 있는 기회라는 점이며, 셋째 모델링의 과정을 평가하고 반추하고 조정하는 것은 외부의 평가들이 아니라 참여자의 개인적(명시적-암묵적) 지식이 되어야 한다는 점이며, 넷째 따라서 성취기준은 언어적 차원의 명시적 기준뿐 아니라 암묵적 차원을 포함한 모델링 궤적과 흐름에 대한 자기평가가 포함되어야 한다. 더 나아가 후속 연구를 제안하면, 실행으로서 모델링의 사례를 다초점(multi-focal lens)(Bikner-Ahsbabs, 2009; Bikner-Ahsbabs *et al.*, 2019; Prediger *et al.*, 2008)으로 분석하고 해석하여 입체적으로 조명할 필요가 있다. 명시적이고 암묵적 차원의 지식이 관여하고 생성되는 모델링을 입체적으로 분석하기 위해 하나의 이론 틀이 아니라 활동에 관한 여러 이론들, 예로 활동이론(Activity Theory)(Engeström & Sannino, 2021)이나 행위자-네트워크 이론(Actor-Network Theory)(Callon, 1986; Latour, 2009; Potts, 2008)으로 모델링을 분석하고 종합할 필요가 있다. 실제로 작동하는 ‘활동’으로써 과학적 실행을 보고 동일한 활동 사례에 대한 다중 이론적 관점에 따른 분석과 해석의

4) “모델링 게임”은 인지적 계열화가 아니라, 참여자들이 게임 규칙을 이해하고 활동을 만들어가는 과정을 의미하며, 그 과정은 분명하지 않으며 규범적이지 않다(Hestenes, 1992). 게임은 ‘자유’, ‘독립’, ‘불확실’, ‘비생산’, ‘규칙’, ‘가상’의 6개 특징이 있다. 과학을 이해한다는 것은 과학적 모델이 어떻게 구성되고 검증되는지를 아는 것으로서, 과학교육의 주요 목표는 모델링 게임을 가르치는 것이므로 학습자들이 모델링 게임에 참여할 수 있도록 하는 것이다. 과학적 실행의 핵심으로서 모델링은 다소 전문화된 사고방식이지만, 참여자들의 모델링은 재료, 비교, 관찰 계획, 실험 및 도구를 통해 볼 수 있는 조건을 구성하는 것으로부터 출발한다. 모델링 게임에서 참여자들은 질문을 하고, 조사를 위한 시스템을 구축 및 수정하고, 다른 조사자들에게 설득력 있는 데이터 표상을 구성하고, 어떤 결론이 보증되고 그들이 얼마나 신뢰하는지를 결정하는데 참여한다. 참여자들은 관심사항을 포착하는 척도를 생성하고, 시스템의 측정과 품질을 공동으로 결정한다. 또한 재료 및 측정뿐 아니라 표상도 적실해야 하며, 다양한 표상 기입 방식을 빼거나 더하면서 해결한다. 다소 성실한 실패를 경험하고, 여러 지시체가 순환하고, 가변성이 유발되고, 유연한 과정이 허용된다. 참여자들은 모델링 게임을 통과하면서 표상 감각과 레퍼토리를 확장하게 된다.

종합은 실행의 중층적 속성과 실제에 대한 경험적 연구로 나아갈 수 있게 될 것이다.

## 참고문헌

- 강경희, 이선경(2001). 개념변화 맥락을 구성하는 개념생태 상호작용에 관한 사례 연구. *한국과학교육학회지*, 21(4), 745-756.
- 강은희, 김찬중, 최승언, 유준희, 박현주, 이신영, 김희백(2012). 심장 혈액 흐름의 모형 구성 과정에서 나타난 소집단 상호작용과 소집단 규범. *한국과학교육학회지*, 32(2), 372-387.
- 고영준(2012). 교육적 경험의 의미: 오우크쇼트와 듀이의 관점. *교육철학연구*, 34(1), 23-43.
- 교육부(2015). *과학과 교육과정*. 세종: 교육부.
- 구리나(2011). 비트겐슈타인 철학의 교육학적 함의. 서울대학교 대학원 박사학위논문.
- 구리나(2014). 비트겐슈타인의 언어적 전회와 확실성: [확실성에 관하여]를 중심으로. *교육철학연구*, 36(3), 1-23.
- 김관영, 이종혁, 최진현, 전상학, 이선경(2022a). 학생의 자유 탐구 활동의 사례 분석을 통해 본 실험 모델링의 특징과 과학교육적 의미. *한국과학교육학회지*, 42(2), 201-214.
- 김관영, 이종혁, 최진현, 전상학, 이혜경, 이선경(2022b). 과학적 실행에서의 데이터 모델링 탐색: 현상의 생성과 증거를 만드는 과정을 중심으로. *생물교육*, 50(4), 529-542.
- 김만희(2003). 플라니의 인식론에 근거한 과학교수의 내러티브적 성격 고찰. *한국교원대학교 대학원 박사학위논문*.
- 김미경, 김희백(2008). 개방적 참담구 활동에서 학생들의 과학의 본성에 대한 이해에 영향을 미치는 요인 탐색. *한국과학교육학회지*, 28(6), 565-578.
- 김영민(1994). 글쓰기, 복잡성의 철학의 해석학을 위하여. *오늘의 문예비평*, 12, 77-104.
- 김지윤, 최승언, 김찬중(2016). 공동생성적 대화가 중학생의 과학적 모델에 관한 이해와 모델 구성에 미치는 영향. *한국지구과학회지*, 37(4), 243-268.
- 노철현(2011). 교육내용으로서의 '지식의 형식'의 의미: 오우크쇼트의 관점을 중심으로. *한국초등교육*, 22(1), 159-180.
- 박희경, 최종림, 김찬중, 김희백, 유준희, 장신호, 최승언(2016). 과학적 모델의 사회적 구성 수업을 통한 과학영재 학생들의 모델링 능력 변화. *한국과학교육학회지*, 36(1), 15-28.
- 신명경, 권경필(2016). 에너지 관련 중등 과학 교과서 단원의 과학 실행(Science Practice) 특징 탐색. *에너지기후변화교육*, 6, 185-197.
- 양찬호, 김수현, 조민진, 노태희(2016). 물질의 입자성에 대한 모형 구성 과정에서 나타나는 소집단 토론과 전체 학급 토론의 특징. *한국과학교육학회지*, 36(3), 361-369.
- 오필석(2020). 과학 교육에서 기능 중심의 과학 탐구에 대한 비판적 고찰. *한국과학교육학회지*, 40(2), 141-150.
- 유근복, 이종혁, 이선경(2022). 행위자-네트워크 이론으로 본 과학적 실행의 현상 생성 사례. *교과교육학연구*, 26, 179-190.
- 이선경, 신명경(2023). *학교 과학 교육 담론*. 서울: 북스힐.
- 이선경, 손정우, 김종희, 박종석, 서혜애, 심규철, 최재혁(2013). 고등학교 과학수업 사례 분석을 통한 학교 과학 탐구의 특징. *한국과학교육학회지*, 33(2), 284-309.
- 이신영, 김찬중, 최승언, 유준희, 박현주, 강은희, 김희백(2012). 소집단 상호작용에 따른 심장 내 혈액 흐름에 대한 소집단 모델 발달 유형과 추론 과정 탐색. *한국과학교육학회지*, 32(5), 805-822.
- 이종봉(2018). 과학교육에서의 지식개념에 대한 비판적 검토: Giere의 모형 기반 과학철학을 중심으로. 서울대학교 대학원 박사학위논문.
- 이차은, 김희백(2016). 과학적 모형 구성 과정에서 나타난 사고 질문의 개념적 자원 활성화의 이해-인식론적 프레임과 위치 짓기 프레임 중심. *한국과학교육학회지*, 36(3), 471-483.
- 장하석(2015). *과학, 철학을 만나다*. 지식 플러스.
- 장하석(2021). 물은 H<sub>2</sub>O인가? 증거, 실재론, 다원주의. (전대호 역). 파주: 김영사. (원서는 2012년).
- 정용재(2020). '설다'와 '익다'의 너나들이: 이종네트워크로서 과학학습. *한국과학교육학회지*, 40(6), 631-648.
- 정용욱(2014). 법칙, 이론, 그리고 원리: 규범적 의미와 실제사용에서의 혼란. *한국과학교육학회지*, 34(5), 459-468.
- 조혜숙, 남정희(2017). 과학교육에서 모델과 모델링 관련 국내 과학 교육 연구 동향 분석. *한국과학교육학회지*, 37(4), 539-552.
- 조희형(1992). 과학적 탐구의 본질에 대한 분석 및 탐구력 신장을 위한 학습지도 방법에 대한 연구. *한국과학교육학회지*, 12(1), 61-73.
- 한기철, 광덕주, 김상섭(2010). 교육철학 방법으로서의 프래그머티즘 재음미: 프랙티스의 교육적 의미를 중심으로. *교육사상연구*, 24(1), 177-203.
- Abd-El-Khalick, F., Boujaoude, S., Duschl, R., Lederman, N. G., Mamlouk-Naaman, R., Hofstein, A., Niaz, M., Treagust, D., & Tuan, H.-L. (2004). Inquiry in science education: International perspectives. *Science*

- Education, 88(3), 397-419.
- Bailer-Jones, D. M. (2009). Scientific models in philosophy of science. University of Pittsburgh Press.
- Berland, L. K., Schwarz, C. V., Krist, C., Kenyon, L., Lo, A. S., & Reiser, B. J. (2016). Epistemologies in practice: Making scientific practices meaningful for students. *Journal of Research in Science Teaching*, 53(7), 1082-1112.
- Bikner-Ahsbabs, A. (2009). Networking of theories-why and how? Special plenary lecture. In V. Durand-Guerrier, S. Soury-Lavergne, & S. Lecluse (Eds.), *Proceedings of CERME6*. <http://www.inrp.fr/publications/edition-electronique/cerme6/plenary-01-bikner.pdf>
- Bikner-Ahsbabs, A., Bakker, A., Johnson, H. L., & Chan, E. (2019). Introduction to the thematic working group 17 on theoretical perspectives and approaches in mathematics education research of CERME11. In U. T. Jankvist, M. van den Heuvel-Panhuizen, & M. Veldhuis (Eds.), *Proceedings of CERME11*. (pp. 3020-3027). Utrecht, NL: Utrecht University.
- Boumans, M. (1999). Built-in justification. In M. S. Morgan & M. Morrison (Eds.), *Models as mediators* (pp. 66-96). NY: Cambridge University Press.
- Callon, M. (1986). Some elements of a sociology of translation: Domestication of the scallops and the fishermen of St brieuc bay. In J. Law (Ed.), *Power, action and belief: A new sociology of knowledge* (pp. 196-233). London: Routledge & Kegan Paul.
- Carey, S., Evans, R., Honda, M., Jay, E., & Unger, C. (1989). "An experiment is when you try it and see if it works": A study of grade 7 students' understanding of the construction of scientific knowledge. *International Journal of Science Education*, 11, 514-529.
- 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.
- Chiu, M. H. & Lin, J. W. (2019). Modeling competence in science education. *Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research*, 1-12. <https://doi.org/10.1186/s43031-019-0012-y>
- Crawford, B. A. (2014). From inquiry to scientific practices in the science classroom. In N. G. Lederman & S. K. Abell (Eds.), *Handbook of research on science education, Volume II* (pp. 529-556). Routledge.
- Dewey, J. (1987). *Democracy and education* (Lee, H. Trans.). Paju: Kyoyookbook. (Original work published 1916).
- Dewey, J. (2002). *The child and the curriculum* (Park, C. Trans.). Seoul: Moonumsa. (Original work published 1902).
- Dunbar, K. (1995). How scientists really reason: Scientific reasoning in real-world laboratories. In R. J. Sternberg & J. E. Davidson (Eds.), *The nature of insight* (pp. 365-395). The MIT Press.
- Duschl, A. R., Schweingruber, A. H., & Shouse, W. A. (2007). *Taking science to school: Learning and teaching science in grades K-8*. Washington DC: The National Academies Press.
- Engeström, Y., & Sannino, A. (2021). From mediated actions to heterogenous coalitions: Four generations of activity-theoretical studies of work and learning. *Mind, Culture, and Activity*, 28(1), 4-23.
- Flick, L. B., & Lederman, N. G. (2006). *Science inquiry and nature of science implications for teaching, learning, and teacher education*. Dordrecht: Springer.
- Ford, M. J. (2015). Educational implications of choosing practice to describe science in the next generation science standards. *Science Education*, 99(6), 1041-1048.
- Furtak, E. M., & Penuel, W. R. (2019). Coming to terms: Addressing the persistence of "hands-on" and other reform terminology in the era of science as practice. *Science Education*, 103(1), 167-186.
- Galison, P. (1997). *Image and logic: A material culture of microphysics*. Chicago: University of Chicago Press.
- Garcia-Mila, M., & Anderson, C. (2008). Cognitive foundations of learning argumentation. In S. Erduran, & M. P. Jimenez-Alexandre (Eds.), *Argumentation in science education* (pp. 29-45). UK: Springer.
- Giere, R. (1988). *Explaining science: A cognitive approach*. Chicago: University of Chicago Press.
- Giere, R. (2018). Models of experiments. In I. F. Peschard & B. C. van Fraassen (Eds.), *The experimental side of modeling* (pp. 59-70). MN: University of Minnesota Press.
- Giere, R., Bickle, J., & Maudlin, F. (2006). *Understanding scientific reasoning*. Ontario: Thomson Wadsworth.
- Gilbert, J. K., Boutler, C. J., & Elmer, R. (2000). Positioning models in science education and in design and technology education. In J. K. Gilbert & C. J. Boutler (Eds.), *Developing models in science education* (pp. 3-19). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Grandy, R., & Duschl, R. A. (2007). Reconsidering the character and role of inquiry in school science: Analysis of a conference. *Science & Education*, 16.

- 141-166.
- Halloun, I. A. (2006). *Modeling theory in science education*. Dordrecht: Springer.
- Hardahl, L. K., Wickman, P. O., & Calman, C. (2019). The body and the production of phenomena in the science laboratory. *Science & Education*, 28, 865-895. Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (1997). *Minds of our own: Can we believe our eyes?* [Videotape]. Annenberg Foundation.
- Havdala, R., & Ashkenazi, G. (2007). Coordination of theory and evidence: Effect of epistemological theories on students' laboratory practice. *Journal of Research in Science Teaching*, 44(8), 1134-1159.
- Heidegger, M. (1962). *Being and time* (J. Macquarrie & E. Robinson, Trans.). New York: Haroer & Row.
- Hesse, M. (1963). *Models and analogies in science*. London: Sheed and Ward.
- Hestenes, D. (1992). Modeling games in the Newtonian world. *American Journal of Physics*, 60(8), 732-748.
- Hodson, D. (2009). *Teaching and learning about science*. The Netherlands: Sense Publishers.
- Irzik, G., & Nola, R. (2010). A family resemblance approach to the nature of science for science education. *Science & Education*, 20(7), 591-607.
- Jimenez-Aleixandre, M. P., & Erduran, S. (2008). Argumentation in science education: An overview. In M. P. Jimenez-Aleixandre & S. Erduran (Eds.), *Argumentation in science education: Perspectives from classroom-based research* (pp.3-27). Dordrecht: Springer.
- Khishfè, R., & Abd-El-Khalick, F. (2002). The influence of explicit reflective versus implicit inquiry-oriented instruction on sixth graders' views of nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 39(7), 551-578.
- Kuhn, D., Amsel, E., & O'Loughlin, M. (1988). *The development of scientific thinking skills*. San Diego, CA: Academic Press.
- Kuhn, D., & Franklin, S. (2006). The second decade: What develops (and how)? In W. Damon, & R. M. Lerner (Series Eds.), *Handbook of child psychology: Vol. 2, Cognition, perception, and language* (6th ed., pp. 953-993). Hoboken, NJ: Wiley.
- Kuhn, T. S. (1970). *The structure of scientific revolutions*. Chicago: University of Chicago Press.
- Kwant, R. C. (1963). *The phenomenological philosophy of Merleau-Ponty*. Pittsburgh: Duquesne University Press.
- Ladyman, J. (2012). *Understanding philosophy of science*. Routledge.
- Lakoff, G., & Johnson, M. (1980). *Metaphors we live by*. Chicago: University of Chicago Press.
- Latour, B. (1987). *Science in action: How to follow scientists and engineers through society*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Latour, B. (2009). *We have never been modern* (Hong, C. Trans.). Seoul: Galmuri. (Original work published 1991).
- Leach, J. (1998). Teaching about the world of science in the laboratory: The influence on teaching of student's ideas. In Wellington, J. J. (ed.), *Practical work in school science: Which way now?* (pp. 52-68). NY: Routledge.
- Lederman, N. G., Abd-El-Khalick, F., Bell, R. L., & Schwartz, R. S. (2002). Views of nature of science questionnaire: Toward valid and meaningful assessment of learners' conceptions of nature science. *Journal of Research in Science Teaching*, 39(6), 497-521.
- Lehrer, R., & Schauble, L. (2015). The development of scientific thinking. In R. M. Lerner (Ed.), *Handbook of child psychology and developmental science* (pp. 1-44). Hoboken: Wiley.
- Louca, L., Elby, A., Hammer, D., & Kagey, T. (2004). Epistemological resources: Applying a new epistemological framework to science instruction. *Educational Psychologist*, 39(1), 57-68.
- Lynch, M. (1985). *Art and artifacts in laboratory science: A study of shop work and shop talk in a research laboratory*. Routledge & Kegan Paul.
- Manz, E. (2015). Representing student argumentation as functionally emergent from scientific activity. *Review of Educational Research*, 85(4), 553-590.
- Matthews, E. (1999). Twentieth-century French philosophy. *Philosophical Quarterly*, 49(195), 281-283.
- Matthews, M. R. (2007). Models in science and in science education: An introduction. *Science & Education*, 16, 647-652.
- McComas, W. F., Clough, M. P., & Almazroa, H. (1998). The role and character of the nature of science in science education. In W. McComas (Ed.), *The nature of science education* (pp. 3-39). Los Angeles: Kluwer Academic Publisher.
- McNeill, K. L. (2011). Elementary students' views of explanation, argumentation and evidence, and their abilities to construct arguments over the school year. *Journal of Research in Science Teaching*, 48, 793-823.

- Mendonça, P. C. C., & Justi, R. (2011). Contributions of the model of modelling diagram to the learning of ionic bonding: Analysis of a case study. *Research in Science Education*, 41(4), 479-503.
- Merleau-Ponty, M. (2013). *Phenomenology of perception*. Routledge.
- Millar, R. (1998). Rhetoric and reality: What practical work in science education is really for. In J. Wellington (ed.), *Practical work in school science: Which way now?* (pp. 16-31). London: Routledge.
- Miller, E., Manz, E., Russ, R., Stroupe, D., & Berland, L. (2018). Addressing the epistemic elephant in the room: Epistemic agency and the next generation science standards. *Journal of Research in Science Teaching*, 55(7), 1053-1075.
- Morgan, M. S., & Morrison, M. (1999). *Models as mediators: Perspectives on natural and social science*. Cambridge University Press.
- Nagel, E. (1960). Logic without metaphysics. *Philosophy*, 35(132), 81-83.
- National Research Council. (1996). *National science education standards*. Washington, D.C.: National Academy Press.
- National Research Council. (2012). *A framework for K-12 science education: Practices, crosscutting concepts, and core ideas*. Washington, D.C.: National Academies Press.
- NGSS Lead States. (2013). *Next generation science education standards: For states, by states*. Washington, D.C.: The Academies Press.
- Oakeshott, M. (1992). Learning and teaching (Cha, M. Trans.). *gyoyugjinheung* (spring-summer), 126-143, 155-169. (Original work published 1967).
- O'Hara, J. G., & Pricha, W. (1987). *Hertz and the Maxwellians: A study and documentation of the discovery of electromagnetic wave radiation*. London: Peter Peregrinus Ltd.
- Paavola, S., & Hakkarainen, K. (2005). The knowledge creation metaphor: An emergent epistemological approach to learning. *Science & Education*, 14(6), 535-557.
- Passmore, C., & Svoboda, J. (2012). Exploring opportunities for argumentation in modelling classrooms. *International Journal of Science Education*, 34(10), 1535-1554.
- Pickering, A. (1995). *The mangle of practice: Time, agency, and science*. Chicago: University of Chicago Press.
- Pierson, A. E., & Clark, D. B. (2019). Sedimentation of modeling practices. *Science & Education*, 28, 897-925.
- Pierson, A. E., Clark, D. B., & Kelly, G. J. (2019). Learning progressions and science practices. *Science & Education*, 28, 833-841.
- Pierson, A. E., Clark, D. B., & Sherard, M. K. (2017). Learning progressions in context: Tensions and insights from a semester-long middle school modeling curriculum. *Science Education*, 101(6), 1061-1088.
- Polanyi, M. (1958). *Personal knowledge*. Chicago: University of Chicago Press.
- Polanyi, M. (1969). *Knowing and being*. Routledge and Kegan Paul.
- Potts, L. (2008). *Diagramming with actor-network theory: A method for modeling holistic experience*. Paper presented in 2008 International Conference on Professional Communication.
- Prediger, S., Bikner-Ahsbals, A., & Arzarello, F. (2008). Networking strategies and methods for connecting theoretical approaches: First steps towards a conceptual framework. *ZDM International Journal on Mathematics Education*, 40(2), 165-178.
- Rea-Ramirez, M. A., Clement, J., & Nunez-Oviedo, M. C. (2008). An instructional model derived from model construction and criticism theory. In J. J. Clement & M. A. Rea-Ramirez (Eds.), *Model based learning and instruction in science* (pp. 23-43). The Netherlands: Springer.
- Rouse, J. (2007). Practice theory. In S. Turner & M. Risjord (Eds.), *Handbook of the philosophy of science Vol 15: Philosophy of anthropology and sociology* (pp. 630-681). Dordrecht: Elsevier.
- Rudolph, J. L. (2005). Inquiry, instrumentalism, and the public understanding of science. *Science Education*, 89, 803-821.
- Schank, R. C., & Abelson, P. A. (1977). *Scripts, plans, goals, and understanding: An inquiry into human knowledge structures*. Psychology Press.
- Sikorski, T. R. (2019). Context-dependent "upper anchors" for learning progressions. *Science & Education*, 28, 957-981.
- Suppe, F. (Ed.). (1977). *The structure of scientific theories*. University of Illinois Press.
- Svoboda, J., & Passmore, C. (2013). The strategies of modeling in biology education. *Science & Education*, 22, 119-142.
- Wellington, J. (1998). Practical work in science: Time for a reappraisal. In Wellington, J. J. (Ed.), *Practical work*

- in school science: Which way now? (pp. 3-15). NY: Routledge.
- Wittgenstein, L. (1953). *The philosophical investigations*. Oxford: Blackwell.
- Woolnough, B. E. (1989). Towards a holistic view of process in science education. In J. J. Wellington, *Skills and processes in science education* (pp. 115-134). London: Routledge.

---

이혜경, 서울대학교 교육종합연구원 객원연구원(Hyekeoung Lee; Visiting Researcher, Center for Educational Research, Seoul National University).

이종혁, 서울대학교 교육종합연구원 객원연구원(Jong-Hyeok Lee; Visiting Researcher, Center for Educational Research, Seoul National University).

최진현, 서울대학교 대학원 학생(Jinhyeon Choi; Graduate student, Seoul National University).

김관영, 서울대학교 대학원 학생(Kwan-Young Kim; Graduate student, Seoul National University).

† 이선경, 서울대학교 교육종합연구원 책임연구원(Sun-Kyung Lee; Principal Researcher, Center for Educational Research, Seoul National University).