



## 학생의 자유 탐구 활동의 사례 분석을 통해 본 실험 모델링의 특징과 과학교육적 의미

김관영, 이종혁, 최진현, 전상학, 이선경\*  
서울대학교

### Characteristics of Modeling of Experiment in Case Analysis of Students' Open Inquiry and its Meaning on Science Education

Kwan-Young Kim, Jong-Hyeok Lee, Jinhyeon Choi, Sang-Hak Jeon, Sun-Kyung Lee\*  
Seoul National University

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received 27 January 2022

Received in revised form

16 February 2022

22 March 2022

30 March 2022

Accepted 4 April 2022

##### Keywords:

scientific modeling, modeling of  
the experiment, distributed  
cognitive system, quantitative  
signs, instrumentalization

#### ABSTRACT

The purpose of this study is to examine the characteristics of model of the experiment in students' open inquiry. The research is a reinterpretation of the data collected from the performance of a three-year research project under the theme of 'school science inquiry' the perspective of model of the experiment. The inquiry activities of a focus group made up of four students have been recorded seven times. The recorded files and transcribed copies were analyzed according to interpretive methods. Students' activities were divided into three modeling of the experiment units, considering the modeling unit that includes the process of starting from the problem until it gets solved. The results of the study include illuminating the dynamic process and characteristics of modeling of the experiment and discussing its educational meaning as a distributed cognitive system at each modeling unit. First, students, instruments, and the primitive form of calculation represented by the interaction between them turned out to be important factors in the distributed cognitive system that constitutes model of the experiment. Second, in the early stages, non-verbal activities were carried out in which students became familiar with instruments, and verbal quantitative signs were created when the activities were sufficiently carried out. The generated quantitative signs became a source of data and confidence that can be referenced in subsequent activities. Third, the specialization of instrumentalization occurred, and factors that were important in inquiry, such as variable control, appeared. The results of the study provide new implications for science education research and education, which have been centered on explanatory models, by unfolding the characteristics of model of the experiment that have not been noticed in science education through students' inquiry.

## 1. 서론

과학교육에서 모델과 모델링을 강조하는 것은 세계적인 흐름으로서, 과학 탐구와 과학적 소양의 핵심적인 부분으로 다루어지고 있다(Schwarz *et al.*, 2009). 미국의 차세대 과학교육표준(Next Generation Science Standards, NGSS)에서는 과학교육의 중요한 목표로 학생들이 스스로 증거에 기반한 모델을 만드는 능력을 함양할 것을 강조하고 있으며, 모델을 현상과 과학 이론을 연결할 수 있는 과학적 설명 방법 중 하나라고 제안하고 있다(NGSS Lead State, 2013). 이와 마찬가지로, 2015 개정 과학과 교육과정은 모델과 모델링을 과학적 실험의 중요한 특징으로 간주하고, 과학적 실험을 위한 기능 중 하나로 '모델의 개발과 사용'을 제시하고 있다(MOE, 2015). 또한, 최근 국가적 차원에서 개발된, 우리나라 교육과정과 과학교육 정책 입안에 안에서 역할을 할 한국형 미래세대 과학교육표준(Korean Science Education Standards, KSES)에서도 역량 차원에서 과학적 탐구력 영역의 하위 영역으로 모델링 능력을 제안하고 있다(Song *et al.*, 2019).

국내에서 수행된 모델과 모델링 관련 과학교육 연구는 1989년부터 2016년까지 85편에 달했으며, 모델과 관련하여 가장 많은 논문이 게재되고 있는 한국과학교육학회지(41/85편, 48.2%)(Cho & Nam, 2017) 사이트에서 검색 키워드를 '모델'로 하였을 때 모델에 관한 논문 약 10건이 현재 추가되어 있다. 교육과정에 모델링이 강조되어 온 세계적 흐름과 유사하게 국내 모델링 관련 과학교육 연구는 2004년부터 조금씩 증가하였고 2012년과 2016년에 가장 많은 편수(각 10편, 12편)를 나타냈다. Cho & Nam(2017)에 따르면, 모델과 모델링 관련 과학교육 연구는 이론적 고찰 및 내용 분석, 인식 조사, 프로그램 개발, 적용 및 효과분석으로 분류될 수 있고, 그중에서 모델 및 모델링 관련 프로그램이나 전략을 적용하여 그 효과를 분석한 논문이 43.6%로 가장 높은 비율을 나타냈다.

GEM 순환(Generation-Evaluation-Modification cycle)은 학생들에게 모델과 모델 구성에 참여할 기회를 제공하기 위하여(Hestenes, 1987; Halloun, 2007; Lopes & Costa, 2007) 제안되고 적용되어 온 대표적인 교수-학습 전략이다(Clement, 2008; Rea-Ramirez *et al.*,

\* 이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2020R111A1A01066598)

교신저자 : 이선경 (sunlee2061@gmail.com)

<http://dx.doi.org/10.14697/jkase.2022.42.2.201>

2008; Gobert *et al.*, 2011). 많은 연구자들은 GEM 순환이 학생들의 인식적 실행(epistemic practice)을 보여줄 수 있는 방법 중 하나로 간주하였는데(Gilbert *et al.*, 2000; Jiménez-Aleixandre, 2014), 이는 학생들이 스스로 모델을 만들고, 평가하고, 수정하여 적용하는 것으로 그 과정은 순환적으로 이루어지는 것을 말한다. 학생들은 GEM 순환에 참여함으로써 초기 모델 구성에서 출발하여 중간 단계를 거쳐 최종 목표 모델에 이르러 자연 현상에 대한 설명 모델을 발달시킬 것으로 기대되며 긍정적인 교육적 효과도 보고되었다(Rea-Ramirez *et al.*, 2008; Lee & Kim, 2016).

GEM 순환에서 학생들은 목표 모델에 도달하기 위한 구조화된 활동이나 실험에 참여하여 모델을 발달시키도록 안내되었으며, 학생들의 모델 구성 과정을 이해하기 위한 연구는 사회적 구성, 규범, 소집단 상호작용, 공동생성적 대화나 논변 등을 통해 다각적으로 시도되었다(Mendonça & Justi, 2011; Kang *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2012; Passmore & Svoboda, 2012; Kim *et al.*, 2016; Park *et al.*, 2016; Yang *et al.*, 2016). 이처럼 GEM 순환은 대체로 학생들이 도달해야 할 목표 모델로서의 설명 모델에 초점을 두고 진행되었으며, 따라서 학생들이 참여하는 활동이나 실험은 설명 모델을 구성하기 위한 활동의 맥락으로 간주되고, 실험에서 획득한 데이터는 상호작용적 대화나 논변의 근거로 처리되었다. 즉, 실험 과정은 설명 모델의 발달을 위한 데이터 수집과 적용의 맥락으로 이해되었다고 볼 수 있다.

모델링 중심의 과학 교수 학습 연구에서 실험이 설명 모델 구성을 위한 활동 장치 혹은 맥락으로 다루어져 온 경향과 달리, 과학철학에서의 모델과 모델링에 대한 이해는 이론적 모델에서 출발하여 그 범위가 점차 넓어지고 상세하게 개념화되고 있다. Suppes, Giere, 그리고 van Fraassen과 같은 과학철학자들이 과학 이론을 모델들의 집합으로 바라보면서 과학에서 모델의 의미와 역할이 크게 재조명되기 시작하였고(Nagel, 1960), 과학 이론에 대한 이러한 관점 변화는 현상에 대한 설명체계인 이론을 구성하는 과학자들의 실제 행위가 모델링 활동으로 구성된다는 이해로 확장되었다. 이후, Suppes(1962)는 자료 모델(data model)의 개념을 도입하면서 과학적 모델이 계층적인 구조를 가질 것이라고 가정하였는데, 최근 Bailer-Jones(2009)는 이러한 생각을 확장하여, 모델의 계층 구조는 이론적 모델(theoretical model), 자료 모델, 그리고 실험 모델(model of the experiment)로 구성된다고 주장하였다(Figure. 1). 그는 이론적 모델과 현상은 밀접하게 연결되어 있지만, 현상에 대한 이론적 모델의 검증은 자료 생성 및 자료 모델링을 통해 우회된다고 보았다. 즉, 관찰과 실험을 통해 현상을 조사하면 해당 현상에 대한 자료가 생성되는데 이론적 모델과 자료를 비교하려면 자료 모델이 필요하다는 것이다. 또한, 현상에서 자료를 얻기 위해서는 자료와 현상 사이에 실험 모델이 삽입되어야 한다고 보았다.

더 나아가, Giere(2018)는 모델의 계층 구조를 세분화하면서 실험 모델의 위치를 구체화하였다(Figure. 2). 먼저, 이론적 모델은 원리 모델(principled models), 표상 모델(representational models) 등을 포괄한다. 원리 모델은 뉴턴 법칙과 같이 과학에서 흔히 법칙이라고 부르는 가장 일반적인 수준의 모델이다. 이는 기존의 경험적 정보나 수학적·통계적 기법을 통해 실제 시스템과 관련된 모델인 표상 모델로 점차 구체화 되고, 궁극적으로는 자료 모델과 비교할 수 있는 수준으로 구체화 된다. 다음으로, 모델의 계층 구조에서 또 다른 주요 요소는 바로 실험 모델이다. 실험 모델은 어떤 현상에 대한 자료 모델을 얻기 위해서 필요한 모델이다. 즉, 실험 모델을 통해 자료 모델이 생성

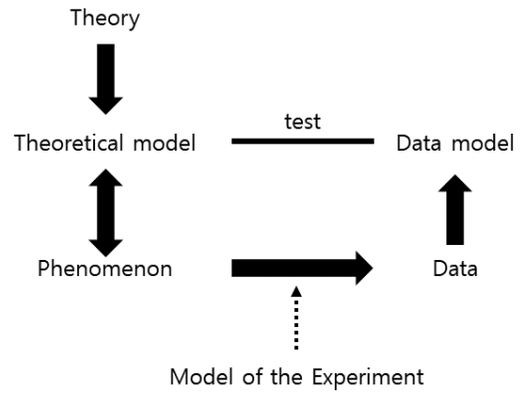


Figure 1. A hierarchy of models (modified from Bailer-Jones, 2009)

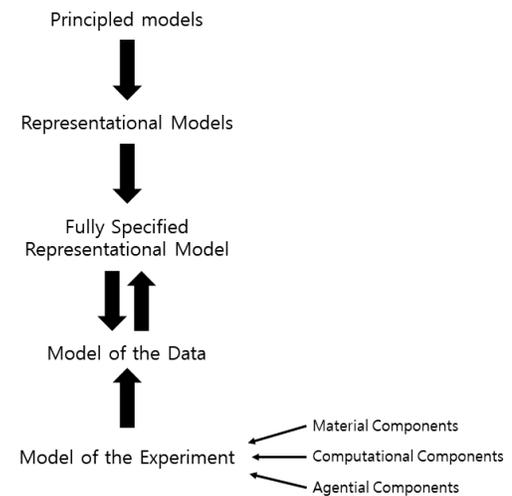


Figure 2. A hierarchy of models (modified from Giere, 2018)

된다. 구체화 된 표상 모델을 검증하기 위해서는 자료 모델이 요구되는데 실험 모델은 그러한 자료 모델을 생성하며, 생성된 자료 모델을 이해하는 데 중요하다. 실험 모델링 과정에서는 물질(material), 행위자(agential), 계산(computational)의 구성 요소들(components)이 협력적으로 작동한다. 물질 요소는 전통적인 실험에서 기구(apparatus)라고 불리던 것을 포함하며, 행위자 요소는 자료 모델과 표상된 이론 모델을 비교하는 등 논리적 추론과 의사결정을 한다. 계산 요소는 초기에 획득되는 데이터부터 컴퓨터 그래픽으로 최종적으로 출력되는 네트워크를 포함한다. Giere(2018)는 이들 구성 요소들로 구성된 실험 모델을 분산인지(distributed cognition) 관점으로 다룰 것을 제안했다.

1) 실험 모델을 분산인지적 관점으로 다룬 예시로 Giere(2018)는 인공위성 기반의 콤프턴 감마선 관측소(the satellite based Compton Gamma Ray Observatory)를 들고 있다. 이 실험의 이론은 매우 큰 별 안에서는 무거운 원소가 생성된다는 것으로, 그러한 동위원소 중 하나는 1.8 MeV 감마선을 방출하면서 붕괴하는 알루미늄의 방사성 동위원소이다. 큰 별이 형성되는 가장 가까운 장소로는 우리 은하의 중심이 있다. 따라서, 그곳에서 방출되는 1.8 MeV 감마선을 관측하면 이론을 직접적으로 확인할 수 있을 것이다. 이를 위한 실험 모델의 구성 요소는 다음과 같다. 물질 요소는 콤프턴 천문대 그 자체이다. 이는 콤프턴 효과를 이용하여 감마선을 검출한다. 실험은 초기 자료 수집부터 최종적인 출력까지 컴퓨터 그래픽으로 확장되는 방대한 계산 네트워크를 포함한다. 특히, 이는 시·공간적으로 확장될 수 있다. 즉, 시간적으로 몇 개월 또는 몇 년에 걸쳐 자료를 수집하게 되며, 공간적으로는 지구 궤도의 망원경을 포함하여, 뉴멕시코, 메릴랜드 그린벨트의 관측소와 연구소에서 자료가 분석되어 통합된다.

이상에서 논의한 것처럼, 과학철학에서는 모델과 모델링의 범위가 점차 넓어지고 상세화되고 있으며 모델링의 계층 구조에서 실험 모델링의 중요성이 부각되고 있으나, 과학교육 연구는 대부분 설명 모델에 초점을 두고 있어서 실험은 설명 모델링을 위한 활동의 맥락 정도로 위치하고 있다(e.g., Lee *et al.*, 2012; Passmore & Svoboda, 2012). 즉, 과학철학에서 강조되고 있는 실험 모델링을 전면으로 놓고 이루어진 과학교육 연구는 찾아보기 어렵다. 또 ‘실험 모델’이라는 명칭이 과거 과학교육 연구에서 제시된 바 있지만(Lee *et al.*, 1989; Cho, 1995; No, 1996; Chae, 2004) 개념학습을 위한 실험 장치나 절차를 의미하였으며, 연구의 초점은 개발된 실험 장치나 절차를 교수·학습에 적용하여 어떤 개념변화를 가져왔는지에 있었다. 이처럼 과학교육 연구에서 실험 모델링 자체에 대한 이해는 매우 부족하며, 실험 모델링의 역동적 과정과 특징을 이해하기 위해서는 Giere(2018)의 제안과 같이 모델링에 관여하는 인간행위자와 도구가 협력하여 창출하는 계산적 행위 등의 분산인지 관점의 해석, 그리고 그 해석과 연관하여 파악할 수 있는 교육적 의미에 대해서 더 깊이 상세하고 풍부한 논의가 요구된다고 할 수 있다. 이에, 본 연구에서는 학생들의 자유 탐구 활동 사례에서 드러나는 실험 모델링은 어떻게 작동하며 그 특징은 어떠한지를 질적으로 탐색하고 과학교육적 의미를 살펴보고자 한다.

## II. 연구 방법

### 1. 연구의 맥락

이 논문은 ‘학교과학탐구’라는 주제로 이루어진 3년간의 연구 과정을 수행하는 과정에서 기수집한 자료를 ‘실험 모델’ 관점에서 재해석한 결과를 다룬다. 기수집한 자료를 사용하는 이유는 교사의 개입이 없는 자유 탐구 활동이기 때문에, 자유롭게 이루어지는 학생들의 탐구 활동에서 실험 모델링이 어떻게 이루어지며, 그 과정에서 드러나는 실험 모델링의 특징을 탐색하기에 적절하기 때문이다.

#### 가. 과학 탐구 동아리

당시 연구에는 서울특별시에는 있는 교육부 지정 과학중점고등학교의 교내 과학 탐구 동아리 활동을 수행한 1학년 학생 10명과 2학년 학생 13명, 총 23명이 참여하였다. 학생들은 학기 초에 한 조당 3~4명씩 총 6개 조(1학년 2개 조, 2학년 3개 조, 1, 2학년 혼합 1개 조)로 편성된 후 교내 동아리 활동 시간을 이용하여 조원 및 동아리 지도교사와 함께 한 학기 동안 탐구 활동을 수행하였다. 동아리 지도교사는 학생들에게 특정 분야에 제한을 두지 않고 자율적으로 조별 논의를 통해 탐구 주제를 선정하도록 하고 탐구 활동을 설계 및 수행하도록 안내하였다. 지도교사는 학생들에게 활동에 대한 특정한 기준을 제공하지 않았으며, 학생들이 지도 교사에게 탐구와 관련된 질문을 하는 경우, 학생 질문에 자연스럽게 답하며 학생들과 상호작용하였지만 직접적으로 탐구 방향을 제시하거나 개입하지는 않았다.

이것이 실험 모델을 이루는 계산적 요소이다. 마지막으로 행위자 요소는 결과 해석, 즉 자료 모델을 관련 이론 모델과 비교하는 작업을 수행하게 된다. 즉, 이론 모델의 세계와 자료 모델을 비교하여 상대적 적합성에 대해 어떤 결론을 내리고, 어느 정도의 확신을 가지고 결론을 내릴 것인지를 결정한다.

### 나. 연구 참여자

본 연구에서는 당시 연구에 참여한 6개의 조 중, 1개 조를 선정하여 학생들의 활동을 깊이 있게 탐색하였다. 본 연구의 방법론인 질적 연구법에서는 다수의 사례를 양적으로 분석하기보다는 소수의 사례를 질적으로 심층 기술(thick description)하는 것이 현상을 이해하는데 보다 유의미한 것으로 보고 있으며, 과학교육 연구에서도 주제와 내용에 따라 1~2인을 사례로 연구한 경우를 종종 찾아볼 수 있다(Kim & Lee, 2005; Lee, 2006; Lee *et al.*, 2010). 따라서, 학생들의 실험 모델링 활동 사례에서 어떠한 일이 벌어지고 있는지 추적하고, 그 특징을 조망하고자 하는 연구 목적에 비추어볼 때, 1개 소집단을 연구 참여 집단으로 선정하여 해당 사례를 심층적으로 기술하는 방법이 적합하다고 판단하였다. 이에 본 연구에서는 영상 및 녹음 자료를 모두 갖추고 있으며 연구 참여자가 스스로 선정한 탐구 주제를 지속하여 수행한 1개 소집단의 활동에 주목하였다.

연구의 초점이 된 소집단은 1학년 남학생 2명(A, B)과 여학생 2명(C, D)으로 구성되어 있었다. 이들은 평소 과학에 관심이 높았으며 과학 실험과 같은 활동을 더 경험해보고자 교내 과학 탐구 동아리에 자발적으로 참여하였다. A는 과학의 여러 분야에 관심이 있으며 특히, 우주에 관심이 많았다. A는 이전에 자유 탐구 형식의 탐구 활동을 해본 경험이 없었지만 조에서 연구 주제를 정할 때 적극적으로 참여하였으며, 탐구 활동 동안 합의된 연구 주제에 대한 만족도가 높았다. B는 과학의 여러 분야 중 물리 분야에 관심이 깊었으며 그중에서 특히, 전기 영역에 관심이 있었다. 과학 탐구 동아리에 참여한 동기는 물리와 관련된 실험을 많이 경험해보고자 한 것으로 탐구 활동에 대한 동기가 확실했다. 이러한 동기는 조별 연구 주제를 물리 분야로 정하는 데 큰 영향을 주었으며, 탐구 활동 간에 주도적인 모습을 하였다. C는 과학에 대한 자신감이 다른 조원에 비해 낮은 편이었으나 실험을 하는 것에 흥미가 있어서 과학 탐구 동아리에 참여하게 되었다. C는 물리와 지구과학 분야에 관심이 있었으며, 이전에 자유 탐구 형식의 탐구 활동을 해본 경험은 없었다. 처음에는 조에서 합의된 연구 주제에 큰 관심이 없었으나, 탐구를 수행하는 과정에서 주제에 대한 흥미가 높아졌다. D는 중학교 때, 교육청에서 운영하는 과학영재교육원에 참여한 바가 있다. 2주에 한 번씩 영재교육원에서 실험 활동을 할 정도로 다양한 실험 경험이 있지만, 본 연구에서 수행된 것과 같은 자유 탐구 형식의 탐구 활동에 참여한 적은 없다. 다른 연구 참여자와 마찬가지로 실험과 같은 과학 활동에 관심이 높으며, 물리와 지구과학 분야에 관심이 높았다. 자신의 조에서 합의된 연구 주제에 대한 만족도가 높은 편이었으며, 탐구를 진행하면서 주제에 대해 더 흥미를 느끼고, 점차 적극적으로 탐구 활동에 참여하였다.

### 2. 자료의 분석 및 해석

자료 분석에는 연구에 참여한 소집단 활동의 영상물과 음성녹음 및 전사본을 사용하였다. 연구진은 총 7회에 걸친 활동의 영상물과 전사본을 상세하게 탐독하며 학생 활동의 특징을 찾고자 하였다. 이후, 학생 활동을 분석하기 위한 이론적 관점을 찾아가며 학생들의 활동에서 발견된 자료의 과학교육적 의미를 해석하고자 하였다. 이와 같은 3단계의 자료 분석 과정은 순환적으로 이루어졌으며(Jo, 1999;

Wolcott, 1994), 자세한 자료 분석 과정은 다음과 같다.

자료 분석의 1단계에서는 녹음된 활동 전사본과 활동 영상물에 대해 3인의 연구자가 열린 형태의 토론을 진행하였다. 여기에는 과학 교육 전문가 1명과 과학교육 전공의 박사 과정에 있는 대학원생 2인이 참여하였으며, 영상물과 전사본을 여러 차례 확인하면서 학생 활동의 흐름을 파악하고 특징을 탐색하였다. 학생들의 활동을 관찰하는 과정에서 연구진이 주목한 특징은 다음 두 가지였다.

학생 활동의 첫 번째 특징은 학생들이 이론이나 개념에 크게 개의치 않고 활동을 진행해나갔다는 점이다. 학생들은 활동 초기에 ‘롤러코스터 만들기’라는 목표를 세웠는데, 활동 과정에서 이론적이고 개념적인 검토는 고려하지 않았고, 대신 ‘일단 해보자’는 식으로 각종 도구를 가지고 롤러코스터의 전체와 부분을 오가며 만드는 활동을 열어나갔다. 학생들의 이러한 활동 방식은 그동안의 과학교육 연구에서 주목하지 않았는데, 학교 과학 교육과정의 범위 내에서 교사나 교재가 요구하는 교육적 방식과 일치하지 않는 것이기도 했다. 그러나 연구진은 이러한 활동 모습이 학생의 자유 탐구 활동에서 나타나는 자연스러운 방식으로 이해했고, 따라서 당시 뒷받침할만한 이론적 근거는 부족했지만, 학생 탐구 활동의 중요한 현상이라는 데 모두 의견을 같이했다.

학생 활동의 두 번째 특징은 다음과 같았다. 7회에 걸친 학생들의 활동은 매끄럽게 진행되지 않았고 몇 가지 문제 상황에 직면하게 되었다. 학생들이 그 문제를 해결해가는 과정에서 학생들 활동의 상호작용 형태는 언어적인 것보다는 비언어적인 것이 주를 이루었다. 활동 과정에서 학생들의 언어는 “아아”, “어떡하지?”, “이거 해보자”, “이렇게 이렇게...” 등 대체로 추임새나 활동을 보조하는 단발성의 반응적인 표현이 많았다. 대신, 학생들은 활동 과정 자체에 집중하였는데, 특정 도구의 쓰임새에 익숙해지거나(예: 자석의 힘과 속도) 여러 도구를 조합하여 목표물을 완성해가는(예: 철사, 자석, 쇠 구슬, 아이클레어로 발사대 만들기) 등의 도구 조작 활동이 주를 이루었다. 가끔 학생들은 자신들이 하는 활동이 어떠한 과학적 이론이나 개념과 연관되는지에 대한 발화를 하는 경우도 있지만(예: “속력은 시간과 거리를 재면...”), 과학적 이론과 개념이 명시적으로 드러나 연쇄적 발화의 주제가 되거나 혹은 활동에서 해결해야 할 질문이 되어 등장하는 경우는 거의 없었다.

자료 분석의 2단계에서 연구진은 앞에 기술한 학생들의 활동 특징을 잘 보여주는 에피소드를 선정하고, 학생들이 활동 과정에서 직면

한 문제 상황과 그 문제를 해결해나가는 방식을 Giere(2018)의 모델 계층 구조와 실험 모델의 관점으로 분석하였다. 서론에 제시된 것처럼, Giere(2018)에 따르면, 실험 모델은 이론/설명 모델과 무관하게 이루어질 수 있으며, 실험 모델링은 분산인지체계로서 물질(material), 행위자(agential), 계산(computational)의 구성 요소들이 협력적으로 작동하는 과정이라고 제시되었다(Figure. 3). 이러한 관점에 따라 연구진은 학생들의 활동을 실험 모델링으로 보고 모델링 과정에서 물질-행위자-계산의 상호구성적 작동을 이해하고자 했다.

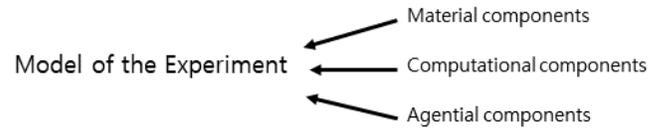


Figure 3. Components of the model of the experiment by Giere(2018)

자료 분석의 3단계에서는 Giere(2018)의 관점에서 학생들의 활동을 분석할 때, 교육적으로 주목할 만한 특징을 다양하게 해석하고자 하였다. Giere(2018)가 제안한 실험 모델을 구성하는 계산적(computational) 요소는 컴퓨터화된 도구를 사용하는 현대 과학의 실험 과정에 적절한 반면, 학생들 활동에서는 단순한 도구를 체화하는 과정에서 신체화된 수량을 발화하는 과정, 즉 원시적(primitive) 형태의 계산에 가까웠다. 연구진은 체화된 암묵적 지식(embodied tacit knowledge)(Polanyi, 1958)과 사회적 프랙티스로서의 표상(representation as social practice)(Roth & McGinn, 1998)을 적용하여 학생들의 체화된 수량화 언어의 의미를 해석하고자 했다. 학생 활동에 관한 자료의 의미를 해석할 수 있는 교육학적 개념이나 이론과의 연결을 시도하는 이와 같은 과정에서 과하거나 무리가 있지 않은지 이론과 자료의 적절성을 지속적으로 검토했다(Jo, 1999). 검토 과정에서, Peirce(1992)가 제안한 경험 기반의 귀추 작용, Wittgenstein의 실험과 계산에 대한 이론(Park, 2014), 그리고 Poincaré의 무의식적 통찰(Kang, 2014)을 참조하였으나, 과도한 해석의 가능성 여부를 고려해 최종적으로 자료 해석에 적용하는 것을 ‘판단 중지’(Yeu, 2016)하였다.

이상의 과정은 순환적으로 이루어졌으며, 학생들의 활동은 3개 실험 모델링 단위로 구분하였다(Table. 1). 연구진은 모델링을 ‘특정 현상/사건에 대한 문제를 해결하는 과정’(Bailer-Jones, 2009)으로 정의

Table 1. The main activities of each classes

차시	목표	주된 활동 내용	핵심 문제 상황	실험 모델링 단위
1	탐구 주제 선정	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 조별 논의를 통한 탐구 주제 설정</li> <li>· 교과서와 개인적 경험을 바탕으로 ‘자석’을 이용한 실험을 하기로 함</li> <li>· 자석 가속기 동영상을 보고 이를 적용한 롤러코스터를 만들기로 함</li> <li>· 자석에 대한 과학적 개념과 원리 정리</li> <li>· 다음 활동에 필요한 실험 도구 정리</li> </ul>	-	-
2	구체적인 실험 목표 설정	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 자석 가속기 동영상을 바탕으로 쇠 구슬을 발사</li> <li>· 구체적인 실험 목표 설정</li> <li>· 롤러코스터 레일 구성을 위한 계획 및 각 코스 구성</li> </ul>	쇠 구슬 발사 속도 조절	실험 모델링 1
3	롤러코스터 레일 구성	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 롤러코스터 레일을 제작 및 각 코스 연결</li> </ul>	원형 레일 구조 제작 및 안정화	실험 모델링 2
4				실험 모델링 3
5	롤러코스터	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 구성된 원형 레일을 구조적으로 안정화하려는 활동</li> </ul>	쇠 구슬의 롤러코스터	-
6	레일 정교화	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 쇠 구슬을 발사하여 구성된 롤러코스터를 완주시키려는 활동</li> <li>· 롤러코스터 레일을 정교화하는 활동</li> </ul>	완주 및 출발 속도 통제	-
7				-

하였으며, 이에 따라 실험 모델링을 ‘실험에서 발생하는 문제 상황을 해결하는 과정’으로 보고, 실험 모델링 단위를 ‘실험 문제 상황으로부터 출발하여 이를 해결하고 마무리되는 과정’을 포괄하는 것으로 보았다. 실험 모델링 1은 ‘쇠 구슬의 발사 속도 조절’이라는 문제가 발생하고 이를 해결하는 과정을 다루고 있으며 주로 2차시에 진행되었다. 실험 모델링 2는 ‘롤러코스터 레일 구성’이라는 문제에 직면하여 발생한 모델링을 다루고 있으며 2차시에 3차시에 걸쳐 이루어졌다. 실험 모델링 3은 ‘롤러코스터 레일 정교화’와 관련된 문제 상황을 다루고 있으며 4차시부터 롤러코스터가 완성될 때까지 진행되었다. 각 모델링 단위에서 실험 모델링의 역동적 과정을 분산인지 관점에서 상세히 기술하고, 그 특징을 과학교육적으로 해석하여 의미를 논하고 기록한 뒤, 이를 토대로 논문을 작성하였다.

### III. 연구 결과 및 논의

연구 결과는 시간에 순서에 따라 학생들이 수행한 3개의 실험 모델링 과정과 그 특징을 다룬다. 각 실험 모델링은 문제 상황과 이를 해결하기 위한 활동으로 구성되어 있으며, 분산인지 관점에서 실험 모델링의 역동적 과정과 특징을 다루고 교육적 의미를 논하였다.

#### ■ 실험 모델링 1. 쇠 구슬의 발사 속도는? “3개면 충분할 것 같아!”

##### 장면 #1. 쇠 구슬 발사 속도에 관한 문제 상황

- 1 A, B, C (발사되는 쇠 구슬을 보며) 오
- 2 B 하나씩 떼어서 옆으로 옮기고
- 3 A **근데 생각보다 (쇠 구슬의 발사 속도가) 안 센데?**
- 4 B 이렇게 해서 이렇게 하면  
... [중략] ...
- 5 A 다시 해 봐
- 6 B 자 시작해
- 7 A 할게요
- 8 A **근데 생각보다 (쇠 구슬의 발사 속도가) 안 세다. 그럼 (네오디뮴 자석과 쇠 구슬 세트들) 기깝게 아니면 자석을 더 쏘까?**
- 9 B

실험대 위에 쇠 구슬, 네오디뮴(Neodymium) 자석, 쥘대(케이블 몰드), 그리고 종이컵 등 각종 도구들이 놓여 있고 그 주위로 학생들이 모여 있다. 학생들은 네오디뮴 자석과 쇠 구슬을 쥘대 위에 이리저리 올리고 종이컵을 쥘대 끝에 배치한 다음, 쇠 구슬을 살짝 밀어보았다. 쇠 구슬은 자석에 부딪혔고 부딪힌 자석은 밀려 나가 또 다른 쇠 구슬에 부딪혀 발사되었다. 이 발사 장면은 학생들의 탄성을 자아냈다(장면 #1의 1줄). 이 활동은 학생들이 1차시에 인터넷을 이용해 시청한, 자석 가속기 동영상 속 장치를 모방하여 단순한 형태로 만들어 보고 실제로 쇠 구슬을 발사해 본 것이었다. 하지만, 자석 가속기 동영상에서의 쇠 구슬 발사 속도와 학생들이 만든 장치에서의 쇠 구슬 발사 속도는 다르게 보였다. 학생들은 쇠 구슬이 발사되는 속도가 영상 속의 쇠 구슬 발사 속도보다 느린 것을 감지했고(장면 #1의 3줄), “쇠 구슬의 발사 속도 조절”은 학생들이 해결책을 필요로 하는 특정 상황으로 문제화(problemizing the context)(Reiser, 2004)되었다. 이윽고 학생

들의 활동은 이 문제를 해결하기 위한 실험 모델링으로 이어졌다.

“쇠 구슬의 발사 속도 조절”이라는 실험 모델링의 문제는 명시적으로 언어화되어 등장한 것은 아니다. 실제 활동에서는 인간 행위자인 학생들과 비인간 행위자인 물질로서의 도구가 협력적으로 특정 현상을 만들어내고 있었을 뿐이었다. 장면 #1에서 볼 수 있듯이, B는 자석과 구슬과 쥘대와 종이컵 등의 도구를 이리저리 배치하고(장면 #1의 2, 4줄) A는 출발점에서 쇠 구슬을 굴렸다(장면 #1의 2-3줄 사이 행동). 쇠 구슬은 A의 손을 떠나서 쥘대 위를 굴러가 자석과 부딪혀 소리를 냈고, 자석은 다시 옆에 있는 다른 쇠 구슬을 때린 뒤, 배치된 자석과 구슬의 수만큼 움직였으며, 쥘대 끝에 있는 종이컵에 들어가서야 움직임을 멈췄다. 쥘대 위의 자석과 쇠 구슬과 종이컵이라는 도구들이 연결되어 만들어진 동적 현상은 학생들의 눈과 귀, 손의 감각에 부딪혀서 그들의 몸에 쇠 구슬의 발사 속도에 대한 ‘감’을 만들어냈다(장면 #1의 3, 8줄). A와 B는 감각적으로 도구들을 재배치하여 구슬을 다시 굴렸고(장면 #1의 5-7줄), A의 손을 떠난 쇠 구슬은 첫 번째 네오디뮴 자석과 쇠 구슬 세트에 부딪힌 뒤, 이윽고 두 번째 쇠 구슬이 튕겨 나갔다(Figure. 4). 이러한 도구들의 움직임과 부딪힘은 네오디뮴 자석과 쇠 구슬 세트만큼 반복적으로 나타났고, 최종적으로 마지막 쇠 구슬이 쥘대 끝에 배치된 종이컵에 들어갔다. 학생들은 도구에 매개된 모델링 활동에 이미 편입되어 있었고, 드디어 구체적으로 속도를 조절하기 위해 도구의 수와 배치에 대해 궁리를 하게 되었다(장면 #1의 9줄).



Figure 4. The students' activities to shoot metal beads

##### 장면 #2. 질적 경험의 양적 발화

- 1 A 아니면 봐봐 이거를 자석을 붙인 채로 달리면 어떨까?
- 2 A 대박이지 봤어? 봤어?  
... [중략] ...
- 3 C 여기는 (쇠 구슬을) 3개 놓아야겠다
- 4 B 여기 많이 놓아도 될 것 같다.
- 5 다른 조 여기 구슬 많이 넣어둘수록 세지는 거야?
- 6 B 맨 뒤에 자석 빼고
- 7 A 튕기는 것은 빼야 해  
... [중략] ...
- 8 B 봐봐
- 9 A 빨리 준비해봐 (쇠 구슬이) 4개 4개
- 10 C 아 진짜 가만히 안 있어?
- 11 B 솔직히 너무 세 (쇠 구슬이) **3개면 충분할 것 같아**  
... [중략] ...
- 12 A 내가 볼 때 (쇠 구슬이) **4개 때가 제일 센 것 같아**

장면 #2는 실험 모델링에서 인간 행위자인 학생들과 물질로서 도구가 협력하는 과정 즉, 도구가 매개된 행위가 이루어지면서 수량화된 기호가 창출되는 상황을 보여준다. A는 쇠 구슬에 네오디뮴 자석을 붙인 채로 출발해보기도 하였다(장면 #2의 1줄). A의 손에서 벗어난 쇠 구슬은 네오디뮴 자석과 쇠 구슬 세트에 부딪혔고, 이러한 과정을 A와 B는 유심히 관찰하였다(장면 #2의 2줄). 한 번은 쇠 구슬이 부딪힌 후 네오디뮴 자석의 뒤쪽 쇠 구슬이 여러 개 튕겨 나갔다. 이 현상은 학생들로 하여금 네오디뮴 자석과 쇠 구슬 세트의 쇠 구슬 수를 바꾸도록 이끌었다. 학생들은 발사된 여러 개의 쇠 구슬 중 한 개를 제외하고 나머지 쇠 구슬을 없앴다. 또 다른 시점에 A의 손에서 출발한 쇠 구슬은 네오디뮴 자석과 쇠 구슬 세트에 강하게 부딪혔다. 중간에 있는 쇠 구슬이 튕기면서 레일을 벗어났다. 학생들은 자석과 쇠 구슬을 다시 배치했고, 쇠 구슬이 다시 출발했다. 학생들은 쇠 구슬 발사 장면을 자세히 관찰했다. 그리고는 자석과 쇠 구슬의 구성을 어떻게 바꿀지 논의했다.

여기에서 학생들의 언어적, 그리고 비언어적 행위는 자석과 쇠 구슬의 수와 배치에 관하여 낱말과 씨실처럼 얽히고 짜여졌다(장면 #2). 언어적 활동으로서 A는 네오디뮴 자석의 수와 쇠 구슬의 수를 조절해 볼 것을 제안하기도 하고, 네오디뮴 자석과 쇠 구슬 세트 사이의 거리를 조절해 볼 것을 제안하기도 하였다. 이에 대한 응답은 언어적 혹은 비언어적 활동으로 이어졌는데, B는 A의 제안에 따라 네오디뮴 자석과 쇠 구슬의 배치를 조절하거나, 때때로 A의 제안에 언어적으로 의견을 더하기도 했고, 혹은 순간적으로 아무 말 없이 네오디뮴 자석과 쇠 구슬의 배치를 바꿔 보기도 하였다. 이처럼 언어적 활동과 결합하여 비언어적 활동이 주로 이루어졌는데, 손으로 쇠 구슬과 자석을 붙인 여러 세트를 만들어 세트들을 쥘대 위에 놓는 등의 실험 도구의 종류와 수, 그리고 그것을 배치하는 과정이 여러 차례 반복 수정되었고, 각 배치에 따른 쇠 구슬 발사 활동 또한 눈을 위시한 온몸으로 관찰되고 감각되었다.

이렇듯 패턴은 유사하지만, 조금씩의 변화를 둔 새로운 활동이 여러 차례 시도되고 관찰되었다. 어느 순간, B가 말했다. “3개면 충분한 것 같아.” 다시 쇠 구슬 발사 활동이 이어졌다. A가 말했다. “내가 볼 때 4개 때가 제일 센 것 같아.” 도구와 학생들의 협력적 활동이 실험 조건의 변수를 통해 충분히 이루어졌을 즈음, 롤러코스터 만들기 적절한 쇠 구슬의 발사 속도에 관한 모델링은 특정 수량의 발화로 마무리되었다.

이상으로 학생들의 역동적인 실험 모델링 과정을 Giere(2018)가 제안한 모델의 계층 구조를 기반으로 요소를 분석하여 도식으로 나타내면 다음과 같다(Figure. 5). Giere(2018)가 실험 모델에서 중요한 3가지 범주로 제안한 물질, 계산, 그리고 행위자 요소와 유사하게, 학생들의 실험 모델링 상황에서도 자석과 쇠 구슬 같은 ‘도구’와 ‘행

위자’인 학생은 실험 모델링을 구성하는 핵심적인 요소로 드러났다. 인간은 고립된 존재로 세계와 마주하는 것이 아니라 도구라는 매개물을 통해서 세계로 열린다. 즉, 인간은 매개-수단-을 갖고-행위하는 행위자(agent-acting-with-mediational-means)로서, 망치, 컴퓨터와 같은 기술적 도구와 언어, 숫자와 같은 심리적 도구에 매개된 행위를 통해 세상에 열려있는 존재이다(Wertsch, 1991). 특히, 과학 탐구에서 이러한 도구는 인간의 인지를 연장하는 매개로서 핵심적인 요소이며, 대부분의 탐구 활동에서 도구의 적절한 사용은 필수적이라는 점에서 (Bud & Warner, 1998; Lee, 2000, 2004, 2009, 2015), 학생들의 실험 모델링 과정에서도 도구는 학생과 더불어 중요한 구성 요소로 드러났다. 마지막으로, ‘계산’적 요소는 학생들이 사용한 도구가 컴퓨터화된 것이 아니기 때문에 명시적으로 드러나지는 않았다. 하지만, ‘행위자’인 학생이 ‘물질’로서의 도구를 매개로(Figure. 5의 실선) 한 실험 모델링에서, 질적인 경험이 양적 발화로 변환되는 원시적(primitive) 형태의 ‘계산’적 행위가 창출(Figure. 5의 점선 화살표)되었다.

‘신체화된 질적 경험의 양적 발화’는 실험 모델링 1에서 주목할 만한 교육적 의미를 갖는다. 쇠 구슬의 발사 속도를 조절하는 문제 상황에서 네오디뮴 자석과 쇠 구슬을 매개로 한 학생들의 활동을 하나의 실험 모델링이라고 할 때, 학생은 인간 행위자로서 다른 인간 행위자뿐 아니라, 자석과 쇠 구슬이라는 비인간 행위자인 도구와 협력하는 사건이 발생했다. 그리고 이러한 도구를 매개한 활동이 충분히 무르익을 때쯤 언어적 표상으로서 “3개면 충분한 것 같아”, “4개 때가 제일 센 것 같아”와 같은 양적 발화가 나타났다. 즉, 도구와 협력하는 학생들의 실행이 충분히 이루어졌을 때, 신체화된 질적 경험은 양적인 기호(2)로 표상(representation)되었다는 것이다. 이와 같은 양적 발화의 순간은 학생들이 자신들의 활동에 대해 확신을 갖는 순간이었으며, 이러한 확신이 들고 나서야 다른 활동으로 넘어갈 수 있었다. 즉, 쇠 구슬 발사에 대한 자기 확신을 얻고 나서야 이윽고 학생들은 레일 구성이라는 다음 모델링 활동으로 넘어갈 수 있었다는 점에서 의미 있는 국면이다.

**장면 #3. 쇠 구슬 발사에 대한 자기 확신**

- 1 B **오늘 한 일 오늘 우리? 한 게 없다**  
... [중략] ...
- 2 B **오늘의 한 일**
- 3 D **뭐야 이거**
- 4 B **우리 자석 가지고 놀았잖아**  
... [중략] ...
- 5 B **이제 좀 질렀다.**
- 6 A **이거 만지지 말고**

2) 기호의 일반적인 정의에 따르면, 기호는 어떤 대상(사물)을 대신하며 물질성과 의미를 가지는 것이다(Lee, 2009). 여기서 물질성이란 사람이 지각할 수 있는 것을 의미한다. 또한, Morris(1946)는 Peirce의 기호 요소(표현체, 대상체, 해석체)를 토대로 세 가지 분야가 구성될 수 있다고 보았다. 그중 화용론은 기호와 해석자와의 관계에 대한 학문으로서 동일한 기호가 맥락에 따라 다른 의미를 가질 수 있음을 보여준다. 따라서, 도구와의 협력을 통해 나타난 학생들의 양적 발화는 소리 즉 음성을 통해 물질성을 가지고 있으며, “3개면 충분한 것 같아.”는 쇠 구슬의 개수에 따라 발사 속도를 조절하는 맥락에서 가장 적합한 쇠 구슬의 수 의미한다는 점에서 기호로 해석할 수 있다. 이에, 본 논문에서는 양적 발화의 순간을 양적 기호의 창출 순간으로 해석하였다. 다만, 학생의 활동 모습에 초점을 둔 경우 양적 발화로 기술하였고, 양적 발화 순간의 의미를 해석하는 맥락에서는 양적 기호의 창출이라고 기술하였다.



Figure 5. Students' modeling 2 of the experiment analysis diagram based on the hierarchy of model from Giere(2018)

- 7 B 재료 쓰자
- 8 A 우리가 쓸게
- 9 D 내가 쓸게
- 10 B 내용을 보자 잘한 점 미흡한 점
- 11 B **잘한 점 뭐 있나 자석과 구조의 성질을 정확하게 파악하였다**  
**잘한 점**
- 12 C 자석과
- 13 B **성질을 완벽하게 파악하였다**

학생들이 쇠 구슬 발사에 관해 자신 확신을 얻었다는 점은 자석과 쇠 구슬을 이용한 활동이 주로 이루어진 2차시에 나는 자기평가적인 담화를 통해서도 확인할 수 있다(장면 #3). 2차시 초반부에 학생들은 자석과 쇠 구슬을 매개로 한 자신들의 활동을 평가할 때 “한 것이 없다.”, “자석을 가지고 놀았다.”와 같이 무의미한 활동으로 평가하였다(장면 #3의 1, 4줄). 하지만, 양적 발화가 나타난 후(장면 #3의 4-5줄 사이 행동), 차시 후반부에서는 “이제 질렸다.”와 같은 말을 할 정도로 학생들은 자석과 쇠 구슬을 이용한 활동에 익숙해졌으며(장면 #3의 5줄), 또한 “자석과 구조의 성질을 정확하게 파악하였다.”와 같이 자신들의 활동을 유의미한 활동으로 스스로 평가하였다(장면 #3의 11, 13줄). 따라서, 학생들은 도구와 상호작용하며 익숙해지는 과정을 거치고 나서 양적 발화가 일어났고, 이러한 양적 발화는 학생들의 자기 확신의 순간이었고 동시에 다음 활동으로 넘어갈 수 있는 순간이었다.

■ 실험 모델링 2. 원형 레일을 어떻게 만들지? “이게 대박이에요!”

장면 #4. 원형 레일 구성에 관한 문제 상황

- 1 B 네오디뮴 더 있어야 돼요. 구슬하고
- 2 교사 더해서 뭐 할 건데?
- 3 B 저희는 길게 만들게요.
- 4 교사 길게 만들어서 뭐 할 것이야?
- 5 B 장애물을 쓰러뜨리게요
- 6 교사 장애물을 쓰러뜨리는 걸로 해서 뭐 할 것이야?
- 7 C, D 아하하  
그냥 뭐 한다고 해서 끝나는 것이 아니잖아. 이걸로 뭔가 알아볼 수
- 8 교사 있는게 ... [중략] ... 이거 다음에 어떻게 더 진전이 있는 것인지 아니면 여기서 그냥 끝내고 다른 실험을 해야 하는 것인지
- 9 B 저희 그 간격과 그거에 대한 속도 같은 거?  
속도를 썰 거면 속도를 어떻게 측정할 것인지를 생각을 해야
- 10 교사 지 그거에 필요한 실험기구도 있을 것 아니야 그런 것을  
지금 생각해야지  
... [중략] ...
- 11 B 자석의 개수를 개수에 따라서 변하는 거지
- 12 C **롤러코스터?**  
**우리 그러자 일단 속도 재고 자석의 개수 만큼에 따라 변하는 속도랑 하나 기구를 이거 평면으로 하면 자투리잡아 비문자 휘기도 하고 한 바퀴 돌기도 하고 근데 그게 가능하냐?**  
... [중략] ...
- 14 A **아니면 저거 줘봐 (쥘대) 이걸로 원을 만들자**
- 15 B 원?
- 16 A 큰 원 작은 원하지 말고
- 17 B **할 수 있을까 이거를**

쇠 구슬을 발사하는 학생들의 활동이 겉으로 보기에 반복되자 교사는 개입하여 학생들에게 무엇을 하고 있는지 물었다(장면 #4의 2-10 줄). 쇠 구슬 발사에 익숙해지고, 교사와의 담화를 통해 학생들은 네오디뮴 자석, 쇠 구슬, 그리고 쥘대를 이용해 롤러코스터를 제작할 수 있다는 가능성을 엿보았다. 이에 학생들은 롤러코스터를 제작하고, 자석의 개수에 따른 쇠 구슬의 속도를 측정하고자 하는 실행 목표를 세웠다(장면 #4의 11-13줄). 구체적인 실행 목표가 설정되면서 학생들은 쇠 구슬의 발사 속도뿐 아니라, 롤러코스터 형태의 레일을 만들어야 하는 문제에 봉착했다(장면 #4의 13, 17줄). 이에 학생들은 자석과 쇠 구슬이라는 도구에서 쥘대라는 도구를 활용하는 활동으로 자연스럽게 초점을 바꾸었다(장면 #4의 13줄). 2차시 후반부와 3차시에서는 롤러코스터 레일 구조를 만드는 활동이 주를 이루었다. 레일 구성은 크게 3개의 코스로 구성되었다. 첫 번째 코스는 출발점으로 쇠 구슬이 발사되는 직선 코스로 구성되었다. 두 번째 코스는 원형으로 구성하기로 하였고, 마지막 코스는 경사진 언덕 코스로 구성하기로 하였다. 코스를 구성하면서 학생들이 맞닥뜨린 가장 큰 문제는 “원형 레일을 만들고 안정화하는 것”이었다(장면 #4의 14-17줄).

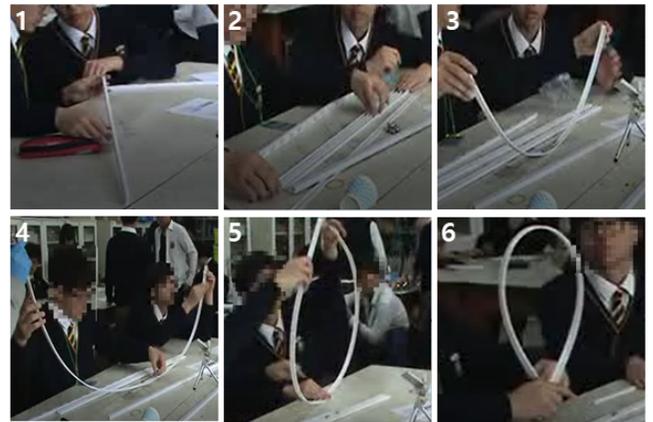


Figure 6. Various activities of students using cable molds.

A와 B는 쇠 구슬을 자석과 함께 뭉쳐 옆으로 잠시 치우고, 각자 쥘대를 손에 쥐었다. 이리저리 쥘대를 돌려보고 쥘대를 옆으로 나란히 붙여보고, 세로로도 붙여보았다(Figure. 6의 1, 2). A와 B는 각자 가지고 있던 쥘대를 U자로 휘어보기도 하고, 두 개의 쥘대를 이어서 U자로 휘어보기도 하였으며, 그 위에 쇠 구슬을 올려놓아 보기도 하였다(Figure. 6의 3, 4). A와 B는 서로 U자로 흰 쥘대를 맞닿게 하여 원형을 만들어 보았다(Figure. 6의 5). 원의 크기가 너무 크다고 생각한 B는 한 개의 쥘대로 원형으로 휘어보았다(Figure. 6의 6). 하지만 쥘대 한 개로 원형 구조를 만들기에는 쥘대의 탄성과 길이의 한계에 의해 둥근 모양을 만들 수 없었다. 이에 두 학생은 두 개의 쥘대를 U자로 흰 후에 원형 레일을 만들어 보기로 하였다.

장면 #5. 도구의 전용화

- 1 교사 우와 이거 뭐야
- 2 C 레일 만들어요
- 3 교사 음 오
- 4 D 근데 (원형 레일 구조의 윗부분) **이게 터져요** 동그랗게 만들고 싶은데 여기만 집중적으로

- 5 교사 아 동그랴게 만들고 싶은데 이게 터지니까
- 6 D 이게 테이프가 약해서 터져요. 이게
- 7 교사 이렇게 막 감아도?
- 8 D 그렇게 하면 여기 못 지나가요.
- 9 교사 아 그러네
- 10 D 그래서 지금 문제예요 고민 중이에요
- 11 C 청테이프 있나요?
- 12 교사 청테이프는 없는데  
... [중략] ...
- 13 교사 위에 보강 공사했네요.
- 14 A 이게 대박이에요
- 15 B 진짜 좋아요
- 16 A 이게 대박이에요

쥘대의 탄성과 길이의 한계를 극복하기 위해 쥘대 두 개를 이어붙이는 과정에서 문제가 발생했다(Figure. 7의 1). 두 쥘대를 이어붙인 부분이 계속해서 터지는 것이었다(장면 #5의 4-6줄). 이를 해결하기 위해 학생들은 테이프, 청테이프, 순간접착제와 같은 도구를 교사에게 요구하였고(장면 #5의 11줄), 그 도구들 이용해 두 쥘대를 안정적으로 연결하려고 시도하였다. 하지만 그것만으로는 문제가 해결되지 못하고 레일의 윗부분이 계속해서 터졌다. 학생들은 새로운 아이디어를 냈다. 쥘대를 짧게 잘라 덧붙여 이음새 부분이 터지지 않도록 보강하는 것이었다(Figure. 7의 2, 빨간 점선 박스). 그 순간 쥘대는 더 이상 레일의 재료로서 존재하는 것이 아니었다. 쥘대는 레일의 재료라는 목적에서 벗어나 이음새를 덧대는 용도로 사용되었다. 그러자 원형 레일 구조는 안정화되었다(장면 #5의 13-16줄).



Figure 7. Making circular rail structure and stabilizing the structure

이상으로 학생들의 역동적인 실험 모델링 과정을 Giere(2018)가 제안한 모델의 계층 구조를 기반으로 요소를 분석하여 도식으로 나타내면 다음과 같다(Figure. 8). 원형 레일 구조를 만들고 안정화하는 문제 상황에서 쥘대와 접착제를 매개로 한 학생들의 활동을 하나의 실험 모델링이라고 할 때, 실험 모델링 1과 유사하게 쥘대와 같은 도구는 인간 행위자인 학생과 함께 실험 모델링을 구성하는 핵심적인 요소로 드러났다. 또한, 학생은 쥘대와 접착제라는 도구와 여러 방식으로 협력하게 되었다(Figure. 8의 실선). 학생은 쥘대의 탄성과 길이와 같은 도구의 한계점을 파악하였고, 이러한 한계점 안에서 원형 구조를 만들어내는 시도를 하였다. 이후 두 쥘대를 안정적으로 이어 붙여야 하는 문제 상황에서 접착제만으로는 이음새를 안정적으로 연

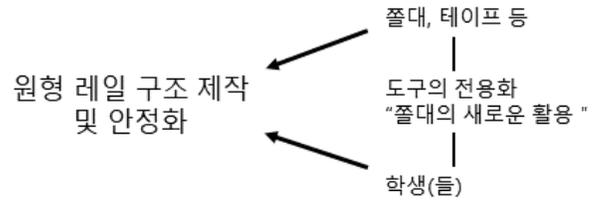


Figure 8. Students' modeling 2 of the experiment analysis diagram based on the hierarchy of model from Giere(2018)

결하지 못하자 레일로 활용되던 쥘대를 잘라 덧대는 용도로 사용하여 문제를 해결하였다. 즉, 실험 모델링 과정에서 쥘대의 탄성과 길이라는 도구의 제약(constraints)이 학생들에게 영향을 미쳐 제한된 범위 안에서 원형 레일 구조가 만들어지는 도구의 조정화(instrumentation)가 발생하였을뿐 아니라, 쥘대가 레일 구조가 아닌 이음새를 안정화하는 용도로 새로운 의미를 형성해가는 도구의 전용화(instrumentalization)가 나타났다.<sup>3)</sup>

‘도구의 전용화’는 실험 모델링 2에서 주목할 만한 교육적 의미를 갖는다. 실험 모델링 과정에서 도구와 행위자가 상호작용하면서 익숙해지는 과정을 통해 도구의 조정화는 물론 도구의 전용화가 발생했다. 실제 과학자의 탐구에서 도구가 중요한 위치를 차지하고 있는 만큼 탐구의 맥락에서 도구를 적절히 사용하는 것은 필수적이다. 이때, 도구를 적절하게 사용한다는 것은 도구의 어포던스(affordance)를 파악하여 맥락적으로 활용하는 것을 의미하는데, 이는 도구의 조정화뿐 아니라 도구의 전용화를 포함한다(Lee et al., 2017). 마찬가지로, 학생들의 실험 모델링 활동에서도 도구를 매개로 한 활동이 주를 이루는 만큼 도구의 적절한 사용은 문제 상황을 극복하는 데 중요한 역할을 하였다. 학교 과학 탐구 상황에서 도구 발생의 특징을 살펴본 Lee et al.(2017)의 연구에 따르면, 도구에 대한 자유로운 탐색과 숙달 과정이 도구의 전용화를 발생하는 맥락을 구성한다고 보았다. 이와 유사하게 학생들은 도구에 익숙해지면서 도구의 전용화가 발생하였고, 이를 통해 당면한 문제를 해결하면서 실험 모델링 활동을 지속할 수 있었다.

또한, 실험 모델링 과정에서 나타난 도구의 전용화는 공학적 실험 과정에서 중요한 역할을 할 수 있다. NGSS에서 제안한 핵심적인 차원 중 하나가 과학과 공학적 실행이다. 이때 공학적 실행이란, 특히 공학적 설계에 초점을 둔 것인데, 학생들이 문제를 정의하고, 문제 해결을 위해 실현 가능한 방법을 설계하고, 여러 번의 평가와 개선을 통해 해결방안을 최적화하는 일련의 과정을 의미한다(NGSS Lead States, 2013; Pruitt, 2014). 이러한 공학 설계 과정은 적절한 해결방안을 만들 때까지 반복되며, 사고 과정에만 국한된 것이 아니라 행위까지 포함하는 특징을 갖는다(Johnson, 1987; Kimbell et al., 1991). 이에 비추어보면, 학생들이 해결해야 했던 문제(원형 레일 이음새의 안정화 등)의 성격은 ‘공학적’인데, 주로 ‘만들기’와 관련된 구체적인 문제를 제기하고 다양한 도구를 사용하여 문제를 해결하는 과정이라

3) 사용자가 인공물과 상호작용하여 인공물을 도구로 통합시키는 과정을 도구 발생(instrumental genesis)이라고 한다. 도구 발생에는 도구의 조정화(instrumentation)와 도구의 전용화(instrumentalization)가 있다. 도구의 조정화는 인공물의 한계가 사용자에게 영향을 미치고 도구 발생이 인공물의 제한된 범위 안에서 이루어지는 것이며, 도구 전용화는 도구 발생 과정에서 사용자의 지식이 인공물의 사용 방법을 안내하고 그 인공물의 의미를 새로이 형성해내는 것을 의미한다(Artigue, 2002; Lee et al., 2017에서 재인용).

는 점에서 그러하다(No, 1996). 초기에 학생들의 문제 해결 과정은 매끄럽지 못하였고, 학생들은 여러 가지 해결방안을 강구하여 반복적으로 문제 해결을 위한 활동(다양한 접착 도구 활용 등)을 하였다. 문제는 쉽게 해결되지 않았으며, 도구의 전용화를 통해 창의적인 해결방안(줄대의 일부를 잘라 이음새를 덧대는 것)이 적용되고 나서야 문제는 만족스럽게 해결되었다. 이러한 문제 해결 과정은 실험 모델링 과정에서 공학적 실행이 자연스럽게 드러나며, 그 과정에서 도구의 전용화 등을 통해 창의적 문제 해결이 나타날 수 있음을 보여준다.

■ 실험 모델링 3. 어떻게 하면 쇠 구슬이 롤러코스터를 완주할 수 있을까? “지금까지 내가 연구해본 결과인데...”

장면 #6. 쇠 구슬 발사와 출발점 구성에 관한 문제 상황

- 1 C 쇠 구슬이 360도 어떻게 돌아?
- 2 B 그만큼 (속도가) 세야 되겠지?  
... [중략] ...
- 3 B 근데 우리가 (출발점의 쇠 구슬을) 손으로 밀 수가 없어
- 4 A 그러면 맨 처음을 내리막길로 시작하자고
- 5 B 처음 스타트를?
- 6 A 아니 애매한데

실험대 위에는 학생들이 만들어낸 롤러코스터 레일과 쇠 구슬, 자석, 청테이프, 가위, 철사 등의 많은 도구들이 어지럽게 펼쳐져 있다. 학생들은 한 번 더 롤러코스터 레일 구조가 안정화되도록 각 코스를 꼼꼼하게 점검하였다. 레일 구조가 어느 정도 안정화되자 학생들은 자신들이 만든 레일 구조를 바로 세웠고, 쇠 구슬을 출발지점에 올려 두었다. 이윽고 학생들은 쇠 구슬이 롤러코스터를 완주할 수 있을지를 고민하였다(장면 #6의 1줄). 학생들은 2차시(실험 모델링 1)에서 한 개의 줄대로 구성된 직선 코스 상황에서만 쇠 구슬을 발사해보았기 때문에, 자신들이 만든 롤러코스터에서 쇠 구슬을 발사하여 레일을 완주시키는 것은 학생들에게 또 다른 문제 상황으로 받아들여졌다(장면 #6의 2줄). 특히, “쇠 구슬을 발사하여 크기가 큰 원형 레일을 통과하도록 하는 것”과 더불어, “쇠 구슬의 출발 속도를 통제하기 위해 출발점을 어떻게 세팅할 것”인가도 함께 초점 문제로 드러났다(장면 #6의 3-6줄).

장면 #7. 도구 사용으로 체화된 ‘감’의 적용

- 1 A 아니지 (원형 레일) 이쪽에도 자석을 붙이고, 이쪽에도 여기서 올라가면서 딱 딱 딱 하는거지
- 2 B 그게 안 되는 게 네오디뮴 자석이 너무 세서 붙어(서) 끝나
- 3 A 그러니까 붙잖아 붙는 반동으로 딱 가는 거지
- 4 B 그게 아니라 자석이 너무 세서. 내 말은 올라가다가 붙어서 안 움직인단니까 자석 힘 때문에 다시 내려간단니까
- 5 A 아니야
- 6 B 해보자 붙여봐 살짝 붙여봐
- 7 A 해놓고 올라가 봐
- 8 B 아 그렇게 하자고?
- 9 A 어

- 10 B 통 통 통 치자고?  
... [중략] ...
- 11 교사 (쇠 구슬이 원형 레일을) 돌리려면 힘이 많이 필요하겠는데?
- 12 A 그렇죠. 그래서 저희가 생각한 게 중간, 중간에 이걸 설치해서 밀면서
- 13 B (발사대) 이거를 몇 개 더 만드는 것이죠
- 14 A (발사대) 하나 둘 세 개 하자
- 15 B (발사대) 4개 하자

조원들이 쇠 구슬이 원형 레일을 돌 수 있을지 고민하자, A는 원형 레일에 자석과 쇠 구슬 세트를 추가로 설치하자고 제안하였다(장면 #7의 1줄). 즉, 일종의 쇠 구슬 발사대를 추가 설치하지는 제안이다. A의 의견을 제대로 파악하지 못한 B는 A의 의견이 불가능하다고 반박하였다(장면 #7의 2-5줄). 그러자 A는 자석과 쇠 구슬 세트를 원형 레일에 붙여보면서 자신의 의견을 피력하였다(장면 #7의 6-10 줄). 논쟁 과정에서 학생들은 “이쪽”, “여기서”와 같이 눈앞에 있는 도구를 지시하는 용어와 “딱 딱 딱”, “통 통 통”과 같은 의성어를 주로 사용하였고, B는 무언의 수궁을 하였다.

쇠 구슬 발사대를 추가 설치하기로 합의한 후, A와 B는 출발점에 자석과 쇠 구슬을 설치하여 쇠 구슬을 시험삼아 발사해보았다. 발사된 쇠 구슬은 원형 레일을 따라 빠르게 위로 올라가다가 중간 지점쯤에서 멈추고 반대쪽으로 굴러 내려왔다(장면 #7의 10-11 사이의 활동). 이를 관찰한 A와 B는 어떻게 발사대의 자석과 쇠 구슬을 구성하고, 몇 개의 발사대를 설치할 것인지에 대해 논의하기 시작하였다. 이때 이전에 드러난 학생들의 모델링 활동과는 사뭇 다른 점을 포착할 수 있었다. 그것은 바로 학생들의 행위가 과감해졌다는 것이다. 가령, 원형 레일에 쇠 구슬 발사대를 설치하기로 합의한 후 몇 개의 발사대를 어떠한 구성으로 설치할 것인가에 대한 논의가 있을 때, “3개 하자”, “4개 하자”와 같은 발화가 과감히 이루어졌다(장면 #7의 14-15줄). 그뿐 아니라, 하나의 발사대를 구성할 때, 자석의 숫자를 “2개로 하자”와 같은 발화도 재빠르게 이루어졌다. 즉, 학생들이 이전에 겪어보지 못한 문제 상황에 노출되었지만, 맨땅에 헤딩하듯 무차별적으로 어떤 행위를 하는 것이 아니라, “이 정도면 될 것 같아”와 같이 일종의 ‘감’을 통해 촉발된 생각을 표현하고, 이러한 생각이 적절한지에 대해 검증하는 행위를 하였다. 이러한 ‘감’은 이전까지의 쇠 구슬 발사 경험이 체화되어 무의식적으로 작용한 것으로 보인다.

장면 #8. 이전에 창출된 양적 기호의 데이터화

- 1 A 우리 출발 어떻게 만들었지?
- 2 B 보면 내가 딱 지금까지 연구해본 결과인데 (쇠 구슬이) 3개가 나아
- 3 A 끝까지 안 올라가는데
- 4 B 한 개를 더 붙여보자

다음으로, 출발점에서 자석과 쇠 구슬을 어떻게 설치할 것인가를 정하는 문제가 있었다(장면 #8의 1줄). A가 출발점에서 자석과 쇠 구슬을 어떻게 구성할지에 대해 질문하자, B는 “내가 연구해본 결과 (쇠 구슬이) 3개가 나아”라고 답하였다(장면 #8의 2줄). 2차시(실험 모델링 1)에서 A와 B는 자석과 쇠 구슬을 가지고 쇠 구슬을 발사해보

는 활동을 반복적으로 하였고, 그 결과 “(쇠 구슬이) 3개면 충분할 것 같아”와 같은 양적 발화가 나타났다(장면 #2). 이러한 점으로 미루어볼 때, B가 이야기한 “내가 연구해본 결과”라는 발화는 실험 모델링 1에서 네오디뮴 자석과 쇠 구슬을 가지고 쇠 구슬을 발사해보는 반복적인 활동의 결과를 의미하며, “3개가 나아”라는 발화는 실험 모델링 1에서 발화된 “3개면 충분할 것 같아.”에서 ‘3개’라는 자신의 경험을 수치화한 양적 기호를 의미한다. 따라서, 학생들은 실험 모델링 1에서 창출한 양적 기호를 데이터로써 인식하고 이를 현재 문제 상황에서 활용하는 것으로 해석할 수 있다.

**장면 #9. 모델링의 정교화로 발생한 변인통제**

- 1 교사 만약 너희가 실험을 제대로 하면은 그런 실험들을 찍어 놓아야 해
- 2 A 개수 세 봐
- 3 교사 **생각을 해봐 너희가 미는 것을 어떻게 측정 할거야?**
- 4 A 그러게요. 그거 쓰자 그냥 (출발점) 이거는 기만히 놔두고 너가 (원형 레일에 발사대 설치) 하자는 거 있지 그걸로 하자 ... [중략] ...
- 5 B 내리막길 하면 이렇게 해서 이렇게 시작하면 되잖아 아니면 우리가
- 6 A **내 말은 살짝 굴리는 게 맞는 게 우리가 미는 속도가 밀 때마다 다르잖아.** 쇠 구슬을 자석이 당길 수 있도록 놓고 천천히 굴러갈 것 아니야. ... [중략] ...
- 7 B **스타트는 생각해 봤어. 출발을 우리 손으로 하지 말고, 스프링 말 그대로 스프링 일정한 간격으로 똑같이 스프링으로 튕겨 가지고** ... [중략] ...
- 8 B 출발점 만들어 볼래?
- 9 C 어떻게 만드는데?
- 10 B 우리가 봐봐 구슬을 이렇게 해서 튕길 거잖아. **근데 손으로 하면 안 되고 뭐 말인지 알겠지?** 일정하게 당길 수 있게 내가 저번에 만들었던 게 이런식으로 해서 이렇게 일정하게 갈 수 있게
- 11 D 그게 튕겨지나?
- 12 B 기다려봐. 아니 일정하게 나갈 수 있게. 안 떨어지게 이렇게. 이런 거 하나 생각을 해봐. 원래 이렇게 할 생각이었거든. 어 괜찮은데 이거? 그래 원래 이렇게 해야 하는데, 이거 좀만 손 보면 될 것 같은데 이거를 멋지게 만들어봐.
- 13 D 근데 여기 이 틈 사이로 들어갈 수 있게 그렇게 해서 만들어야겠다.
- 14 B 이거를 돌려주자 이렇게 그래 이거 ... [중략] ...
- 15 D 철사로 만들었어?
- 16 B 워를
- 17 D 이거 스프링
- 18 B **어 그거 철사로 감은 거였어**
- 19 D 잘 만들었다

출발점 세팅 구성과 관련하여 나타난 또 하나의 흥미로운 사건은 학생들이 변인통제를 하려고 시도했다는 점이다(장면 #9). 쇠 구슬이 원형 레일을 통과하도록 하기 위한 논의가 이루어지던 중 교사가 개

입하여 “너희가 (쇠 구슬을) 미는 것을 어떻게 측정할거야?”라는 질문을 하였다(장면 #9의 3줄). 이러한 질문은 교사가 변인통제를 해야 한다는 점을 명시적으로 드러낸 발화가 아니었다. 하지만 학생들은 자신들이 굴리는 쇠 구슬의 출발 속도를 측정할 수 없다는 점을 인식하게 되었고, 이어 쇠 구슬의 출발 속도를 일정하게 하기 위한 활동을 자연스럽게 하게 되었다.

처음에 B는 출발점을 내리막길로 만들어서 손에 의한 출발 속도의 변인을 줄이고자 하였다(장면 #9의 5줄). 이후 B는 새로운 아이디어로 스프링을 출발점에 활용하기로 제안하였다(장면 #9의 7줄). 즉, 상대적으로 불안정한 사람의 손을 타게 하는 것보다 도구를 이용해 변인을 통제하려고 하였다. 결과적으로 B는 철사를 감아서 스프링으로 만들었고, 이를 이용하여 출발점을 세팅하였다(장면 #9의 8-19줄). 이러한 장면들은 변인통제를 위한 학생들의 활동이 자연스럽게 정교화될뿐 아니라, 본래 레일 구조로 사용하려고 하였던 철사가 출발점을 통제하기 위한 스프링으로 활용되는 도구의 전용화가 일어나는 또 다른 예로 볼 수 있다.

이상으로 학생들의 역동적인 실험 모델링 과정을 Giere(2018)가 제안한 모델의 계층 구조를 기반으로 요소를 분석하여 도식으로 나타내면 다음과 같다(Figure. 9). 롤러코스터를 완주하고, 쇠 구슬의 출발 속도를 통제하려는 실험 모델링 상황에서도 마찬가지로 쇠 구슬 발사대나 롤러코스터 레일과 같은 도구는 인간 행위자인 학생과 함께 실험 모델링을 구성하는 중요한 요소로 드러났다. 다만, 이전의 실험 모델링에서 도구는 자석, 쇠 구슬 그리고 쫄대 그 자체였다면, 여기서는 이들이 서로 결합되어 있는 형태로써 쇠 구슬 발사대 또는 롤러코스터 레일 그 자체가 하나의 도구로서 나타났다. 학생은 쇠 구슬 발사대와 롤러코스터 레일이라는 도구와 여러 방식으로 협력하게 되었다(Figure. 9의 실선). 그 과정에서 학생은 이전 모델링 상황에서 도구 사용으로 체화된 모종의 ‘감’과 창출된 양적 기호의 데이터화를 통해 모델링 활동을 과감하게 수행했고, 이에 더하여 변인통제와 같은 활동이 자연스럽게 드러나면서 실험 모델링 활동이 정교해졌다.

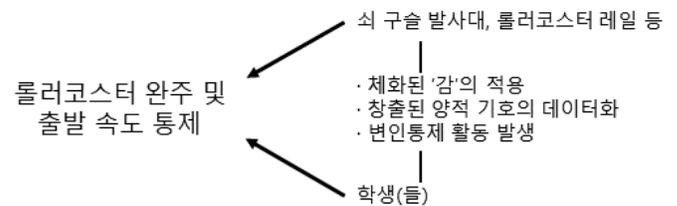


Figure 9. Students' modeling 3 of the experiment analysis diagram based on the hierarchy of model from Giere(2018)

‘체화된 감의 적용’, ‘창출된 양적 기호의 데이터화’ 그리고 ‘변인통제 활동 발생’은 실험 모델링 3에서 주목할만한 교육적 의미를 갖는다. 첫째로, 실험 모델링 1에서 이루어진 학생들의 쇠 구슬 발사 활동을 보면 자석과 쇠 구슬의 수를 맨땅에 헤딩하듯 바꿔가며 쇠 구슬 발사에 대한 ‘감’을 익혀 나가는 모습을 보였다. 하지만, 실험 모델링 3의 쇠 구슬 발사대를 추가 설치하는 문제 상황에서는 이와 달리, 설치할 발사대의 수를 정할 때, “(발사대) 4개 하자”와 같이 이미 획득된 것처럼 보이는 모종의 ‘감’을 통해 대략의 출발점을 가지고 구체적인 행위에 과감하게 돌입했다. 이는 운동감각적 경험에 토대를 둔 무의식적 논리의 발현으로 해석할 수 있다(Thagard, 2012). 무의식적

사고 또는 무의식적 통찰은 의식적이고 합리적인 기제와는 구별되는 데, 이는 어떤 문제의 해답이 불현듯 떠오르는 것을 의미한다. 이러한 추측 또는 어림짐작은 무의식적으로 작동이 가능하지만, 모종의 논리가 숨어 있다(Kang, 2014). 마찬가지로 발사대 설치라는 새로운 문제 상황에서 학생들은 실험 모델링 1에서 익숙해진 쇠 구슬 발사 경험을 통해 형성된 ‘감’으로 어림짐작하여 재빠르게 언어적 발화로 활동의 출발점을 제안하였고, 이를 검증하기 위한 구체적인 실행에 곧장 나선 것으로 해석할 수 있다.

둘째로, 실험 모델링 1에서 창출된 양적 기호가 일종의 데이터로 활용되었다는 점이다. 양적 기호의 창출은 도구와의 상호작용을 통해 발생한 신체화된 질적인 경험들이 “3개면 충분할 것 같아”와 같이 양적 발화로 표상된 것으로, 말로서 표상된 이러한 기호는 “내가 딱 지금까지 연구해본 결과인데 (쇠 구슬이) 3개가 나아.”와 같이 학생들에게 일종의 데이터로 인식되어 물리코스터 완주라는 새로운 문제 상황에서 문제 해결을 위한 논의에 활용되었다. 이는 창출된 양적 기호가 일종의 기입(inscription)으로 작동한 것으로 볼 수 있다. 기입이란, 종이, 컴퓨터 모니터와 같은 매개물을 통해 물질적으로 체현된 기호를 의미한다(Latour, 1987; Roth & Mcginn, 1998). 기입은 물질적인 특성을 가지기 때문에 정서적인 표상과는 달리 사회적인 실행을 가능하게 하는 경계 물체(boundary objects)로서 기능을 할 수 있다(Henderson, 1991; Fujimura, 1992). 비록 학생들이 발화로 표상한 기호는 물질적으로 체현되지는 못했지만, 이를 데이터로 인식하고, 활용하여 문제 해결을 위한 논의에 활용함으로써 사회적 실행을 촉진하였다는 점에서 교육적으로 의미가 있다.

셋째, 기존의 과학 탐구 과정에서 중요하게 다루어지는 변인통제가 자연스럽게 드러나면서 모델링 활동이 정교해졌다. 물론 “너희가 (쇠 구슬을) 미는 것을 어떻게 측정할거야?”라는 교사의 질문이 시발점이 되어 변인통제와 관련된 활동이 시작되었지만, 교사가 변인을 통제해야 한다는 점을 명시적으로 드러내거나, 교사와 학생의 담화에서 ‘변인통제’라는 용어가 명시적으로 나타나지는 않았다. 하지만, 학생들이 변인통제를 고려하는 활동을 전개하면서 변인통제가 실험 모델링에 자연스럽게 녹아들었다. 변인통제를 위해서는 실험 상황을 구성하고 있는 변인을 파악하고, 정량화하고, 선택하고, 조정해야 하므로 과학과 교육과정에서는 통합적 탐구 능력에 포함시킨다(MOE, 2015). 학교에서 수행하는 단순(simple) 탐구실험에서 한두 가지 변인을 다루게 되는 것과 달리, 참(authentic) 탐구 혹은 비구조화된(ill-structured) 문제 상황에서 변인은 선택되는 것뿐 아니라 창출되는데(Chinn & Malhotra, 2002), 학생들의 실험 모델링에서도 도구에 대한 숙달, 그리고 다양한 도구의 배치와 작동이 전개되면서 변인이 창출되는 것을 보여준다. 학생들은 실험 모델링 과정에서 도구에 숙달되면서 쇠 구슬 발사 속도라는 ‘감’을 얻었다. 이는 ‘속도’라는 ‘변인’에 대한 일관성을 체화한 것이며, 속도와 관련된 변인들을 암묵적으로 이해하게 되었다는 것을 의미한다. 그리고 그 속도 변인을 조절하기 위해 학생들은 속도와 관련된 변인들을 특정하고 통제하기 위한 활동을 한 것으로 해석할 수 있다.

#### IV. 결론 및 제언

본 연구에서는 과학교육에서 그동안 주목받지 못했던 실험 모델을

조명해보고자, 자유 탐구 형식으로 진행된 학생들의 탐구 활동의 사례 분석에서 나타나는 실험 모델링의 특징을 질적으로 탐색하였고, 그 과정에서 드러나는 과학교육적 의미를 논의하고자 하였다. 교사의 개입이 최소화된 자유로운 탐구 상황에서 학생들의 실험 모델링은 어떠한 이론적이고 개념적인 틀에 제한되기보다는 ‘일단 해보는’ 방식의 역동적인 모습을 주로 나타냈다. 학생들의 이러한 역동적인 실험 모델링 과정을 Giere(2018)가 제안한 모델의 계층 구조 관점에서 들여다본 결과, 실험 모델링 상황에서 ‘도구’는 ‘행위자’인 학생과 더불어 실험 모델을 구성하는 핵심적인 요소로 드러났다. 한편, 학생들의 실험 모델링 상황이 컴퓨터화된 도구를 사용해야 할 만큼 복잡한 상황이 아니었기 때문에, 실험 모델을 구성하는 또 다른 요소인 계산적 요소는 명시적으로 드러나지는 않았다. 하지만, 실험 모델링 상황에서 행위자인 학생은 문제 상황을 해결하기 위해 단순한 도구들과 협력하는 사건이 벌어지면서 도구를 매개로 한 활동을 주로 하였다. 이러한 과정에서 학생들은 도구에 익숙해졌으며 특히, 단순한 도구를 체화하는 과정에서 신체화된 수량을 발화하는 모습을 보였다. 이는 원시적 형태의 계산적 요소로 해석될 수 있다.

실험 모델링 과정에서 학생들이 도구와 상호작용하고, 익숙해지는 과정에서 교육적으로 의미 있는 장면을 포착할 수 있었다. 먼저, 신체화된 수량을 발화하는 장면 즉, 양적 기호가 창출되는 순간이다. 이러한 양적 발화의 순간은 학생들이 자신의 모델링에 확신을 갖는 순간이었으며, 현재의 모델링 활동을 정리하고 새로운 모델링 활동으로 전환되는 국면이 되는 순간이었다. 또한, 창출된 양적 기호는 새로운 실험 모델링 상황에서 데이터화되어 모델링 활동의 자원이 되었다. 두 번째는 도구와의 상호작용을 통해 도구의 전용화가 나타났다. 이는 창의적 문제 해결을 통해 모델링 활동을 지속할 수 있는 계기가 되었다. 세 번째는 도구 사용으로 체화된 ‘감’을 통해 실험 모델링에서의 행위가 과감해졌을뿐 아니라, 기존의 과학 탐구 과정에서 강조하는 변인통제와 같은 요소들이 자연스럽게 드러나면서 모델링 활동이 정교해지는 등 실험 모델링 활동의 양상에 변화가 나타났다.

이상의 연구를 통해 학생의 실험 모델링을 위한 교육에 대한 제언은 다음과 같다.

첫째, 실험 모델링에서 도구와 행위자가 핵심적인 구성 요소로 드러난 만큼, 그들 간의 상호작용으로 학생이 도구에 익숙해지는 것에 대한 교육과 연구가 확산되어야 한다. 도구를 매개로 한 행위를 통해 인간이 세상에 열린다는 관점(Wertsch, 1991)을 견지하면, 학생들이 도구에 익숙해지는 것은 자연 세계에 대한 인식이 넓어지는 과정이다. 그리고 이러한 과정을 통해 신체화된 질적 경험의 양적 발화, 도구의 전용화, 그리고 실험 모델링 활동의 양상 변화가 나타날 수 있었다. 특히, 양적 기호의 창출이나 도구 전용화의 발생은 학생들이 자신의 모델링 활동에 대한 자신감을 얻고, 모델링 활동을 지속할 수 있는 자원이 되면서 모델링 활동을 지속 및 발전할 수 있게 되었다. 따라서, 실험 모델링 상황에서 학생들이 도구에 익숙해지는 시간이 교육적으로 가치가 있음을 이해하고, 교육적으로 이러한 시간을 충분히 제공할 필요가 있으며, 이에 관한 연구가 필요하다.

둘째, 학생들의 신체화된 수량의 발화 즉, 원시적 형태의 계산적 발화를 기입으로 이어지도록 하는 교수적 노력이 필요하다. 본 연구의 핵심적인 결과 중 하나는 학생들의 양적 기호의 창출이다. 이러한 양적 기호는 학생들이 자신의 질적인 경험을 양적인 것으로 표상하면

서, 학생들에게 데이터로 인식되었다는 점에서 중요하다. 창출된 양적 기호는 하나의 데이터로 활용되어 새로운 문제 상황에서 문제 해결을 위한 논의를 촉발하고, 조원들 간의 논의를 매개하는 역할을 하였다. 즉, 일종의 기입으로 작동하였다. 하지만, 기입이 사회적 실행을 촉진할 수 있는 핵심적인 이유가 물질적인 것으로 체현되기 때문이라는 점에 비추어볼 때, 학생들이 자신들의 활동 결과 창출된 양적 기호를 물질에 체현하지 않고 발화에 그친 것은 다소 아쉬운 점이다. 따라서 실험 모델링 활동을 하면서 학생들이 스스로 판단할 때, 자신들의 활동에서 중요하다고 생각되는 실험 장면이나 내용을 글이나 이미지와 같이 물질적으로 기록될 수 있도록 하고, 학생들이 그것을 적절히 활용할 수 있도록 하는 지도전략이 필요하다.

셋째, 교사는 학생이 실험 모델링 과정에서 겪은 개인적인 경험을 교육자원으로 활용하여 공적 경험으로 대체해줄 필요가 있다. 학생의 실험 모델링 과정을 보면 학생들의 활동 형태는 언어적인 것보다는 비언어적인 것이 주를 이루었으며, 언어적인 부분도 공적인 과학적 개념보다는 추임새나 지시어 등이 주로 등장했다. 이는 학생들의 실험 모델링 활동이 과학 이론에 의존하거나, 과학 이론으로부터 시작되기보다는 일단 무엇인가 해보면서 시작된다는 것으로 해석할 수 있다. 즉, 맥락 특이적이고, 개인적인 경험의 특징을 갖는다. 교사는 이러한 맥락 특이적이고 사적인 학생들의 경험을 교육자원으로 활용하여 공적인 경험으로 바꾸어주어야 할 것이다.

학생의 경험을 공적인 경험으로 바꾸어주기 위한 교육 전략으로 두 가지 측면을 고려해볼 수 있을 것이다. 하나는 과학적 개념의 도입이다. 예를 들어, 학생들이 쇠 구슬을 발사해보는 경험은 쇠 구슬의 발사 속도를 조절하기 위한 모델링 맥락에서 이루어진 활동이었고, 학생들의 개인적인 경험에 머물러 있었다. 다시 말하면, 개인적 경험을 통한 체화를 통해 자신들이 원하는 쇠 구슬의 발사 속도를 얻었다. 하지만, 쇠 구슬 발사에 숨어 있는 공적인 지식 즉, 물리학적 원리를 명확하게 이해하지는 못했다. 따라서 학생들의 쇠 구슬 발사 활동 경험을 자원으로 활용하여 적절한 시기에 교사가 운동량과 같은 물리학적 개념과 원리를 제공할 필요가 있다. 즉, 이론을 가르치고 이를 확인하기 위한 맥락으로 실험 모델링 활동을 하는 것이 아니라, 실험 모델링 활동에서 학생들이 경험하고, 익힌 것을 명료화하기 위해 이론을 제공하는 것이다.

두 번째로 학생이 생성한 초기 기입을 자원으로 하여 이를 구체화할 수 있도록 개입하는 것이다. 과학자든 학생이든 측정, 계산과 같은 실행을 통해 자연 현상에 대한 기입을 생성한다. 이때 생성된 기입이 공동체 내에서 합법적인 표상으로 인정되는지에 대한 여부는 기입 생성과정에서의 실행이 얼마나 공동체 내에서 공유되는 신뢰로운 것인지에 달려있다(Roth & Bowen, 1994; Roth & Meginn, 1998). 따라서, 학생들이 실험 모델링 과정에서 나타난 초기 활동이 과학 공동체 내에서 공유되는 방식과 다소 거리가 있더라도 이를 통해 생성된 기입을 바탕으로 과학 공동체 내에서 공유되는 방식을 도입하여 정교화하는 전략을 구사할 필요가 있다. 예를 들어, 학생들은 쇠 구슬 발사 실험 모델링 활동을 통해 “3개면 충분한 것 같아”와 같은 발화를 하였다. 이때, 학생들이 이를 기입 하었다고 가정할 때, 학생들이 이 기입을 생성할 때 했던 활동들이 일부 무작위하게 이루어진 면이 있으므로 과학 공동체에서 공유되는 실행으로 생성된 기입으로서 신뢰받기 어렵다. 하지만, 쇠 구슬의 숫자에 따라 속도가 어떻게 변화하는지를 조사하여 그래프화하여 기입하였다면 좀 더 과학 공동체에서 공유되

는 실행과 가까워질 수 있을 것이다.

상기한 바와 같이 모델의 계층 구조에서 이론적 모델만큼 실험 모델이 중요한 위치를 차지하고 있음에도 실험 모델링은 모델링 중심의 과학 교수-학습 연구에서 크게 주목받지 못했다. 이에 본 연구는 학생들의 활동 사례를 통해 실험 모델링의 특징을 펼쳐 보임으로써, 설명 모델 중심으로 이루어져 왔던 과학교육 연구와 교육에 새로운 시사점을 제공한다. 후속 연구로서, 모델에 대한 총체적 이해에 더한 모델링 중심의 과학 교수-학습 연구와 교육이 이루어지기 위해 모델의 계층 구조에 근거해 실험 모델과 더불어, 이로부터 산출되는 자료 모델로 연구가 확장될 필요가 있다.

## 국문요약

본 연구에서는 학생들의 자유 탐구 활동에서 나타나는 실험 모델링의 특징을 탐색하였다. 연구는 ‘학교과학탐구’라는 주제로 이루어진 3년의 연구 과제 수행에서 기수집한 자료를 ‘실험 모델’ 관점에서 재해석한 것이다. 4명의 학생들로 구성된 1개 소집단이 7회에 걸쳐 수행한 탐구 활동을 녹화하고 녹음한 파일을 주된 자료원으로 하였으며, 녹화 및 전사본을 해석적인 방법에 따라 분석하였다. 문제 상황으로부터 출발하여 이를 해결하고 마무리되는 과정을 포괄하는 것을 모델링 단위로 볼 때, 학생들의 활동은 3개 실험 모델링 단위로 구분되었다. 연구의 결과는 각 모델링 단위에서 분산인지체계로서 실험 모델링의 역동적 과정과 특징을 조명하고 교육적 의미를 논하는 것을 포괄한다. 구체적으로는 첫째, 학생과 실험도구 그리고 그들 사이의 상호작용으로 나타나는 원시적 형태의 계산은 실험 모델링을 구성하는 분산인지체계의 중요한 요소로 드러났다. 둘째, 초기에 학생이 도구에 익숙해지는 비언어적인 활동이 이루어졌으며, 그 활동이 충분히 이루어졌을 때 언어적인 양적 기호가 창출되었다. 창출된 양적 기호는 이후 활동에서 참고할 수 있는 데이터와 자신감의 원천이 되었다. 셋째, 도구의 전용화가 발생하였으며, 변인통제와 같이 기존의 과학 탐구에서 중요하게 다룬 요소들이 나타났다. 연구의 결과는 기존의 과학교육에서 주목받지 못했던 실험 모델링의 특징을 학생 활동을 통해 펼쳐 보임으로써, 설명 모델 중심으로 이루어져왔던 과학교육 연구와 교육에 새로운 시사점을 제공한다.

**주제어 :** 과학적 모델링, 실험 모델링, 분산인지체계, 양적 기호, 도구의 전용화

## References

- Bailer-Jones, D. M. (2009). *Scientific models in philosophy of science*. University of Pittsburgh Press.
- Bud, R., & Warner, D. (1998). *Instruments of science. An historical encyclopedia*. London and New York: Smithsonian Institution.
- Chae, D. H. (2004). The changes of preservice and inservice elementary school teacher' concepts of the solar system based upon their exposure to the earth motion centric solar system model. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 24(5), 886-901.
- Chinn, C. A., & Malhotra, B. A. (2002). Epistemologically authentic inquiry in schools: A theoretical framework for evaluating inquiry tasks. *Science Education*, 86, 175-218.
- Cho, H. S., & Nam, J. (2017). Analysis of trends of model and modeling-related research in science education in Korea. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 37(4), 539-552.
- Cho, J. I. (1995). The use of models and their effect on scientific

- understanding of diffusion and osmosis, and on scientific attitude. *Biology Education*, 23(1), 1-8.
- Clement, J. J. (2008). Student/teacher co-construction of visualizable models in large group discussion. In J. J. Clement & M. A. Rea-Ramirez (Eds.), *Model based learning and instruction in science* (pp. 11-22). Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- Fujimura, J. (1992). Crafting science: Standardized packages, boundary objects, and "translation." In A. Pickering (Ed.), *Science as practice and culture* (pp.168-211). Chicago: University of Chicago Press.
- Giere, R. N. (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.
- Gilbert, J. K., Boulter, C. J., & Elmer, R. (2000). Positioning models in science education and in design and technology education. In J. K. Gilbert, & C. J. Boulter (Eds.), *Developing models in science education* (pp 3-17). Dordrecht: Kluwer Academic.
- Gobert, J. D., O'Dwyer, L., Horwitz, P., Buckley, B., Levy, S., & Wilensky, U. (2011). Examining the relationship between students' understanding of the nature of models and conceptual learning in biology, physics, and chemistry. *International Journal of Science Education*, 33(5), 653-684.
- Halloun, I. (2007). *Modeling theory in science education* (Vol. 24). Netherlands: Springer Science & Business Media.
- Henderson, K. (1991). Flexible sketches and inflexible data bases: Visual communication, conscription devices, and boundary objects in design engineering. *Science, Technology, & Human Values*, 16, 448-473.
- Hestenes, D. (1987). Toward a modeling theory of physics instruction. *American Journal of Physics*, 55(5), 440-454.
- Jiménez-Aleixandre, M. P. (2014). Determinism and underdetermination in genetics: Implication for students' engagement in argumentation and epistemic practice. *Science & Education*, 23(2), 465-484.
- Jo, Y. H. (1999). Qualitative description, analysis, interpretation. *The Korean Society For The Study of Anthropology of Education*, 27-63.
- Johnson, S. D. (1987). Teaching problem solving. *The Technology Teacher*, 46(5), 15-17.
- Kang, E., Kim, C., Choe, S., Yoo, J., Park, H., Lee, S., & Kim, H. (2012). Small group interaction and norms in the process of constructing a model for blood flow in the heart. *Journal of The Korean Association For Science Education*, 32(2), 372-387.
- Kang, M. (2014). Abduction and forced choice: Empirical justification for logic of the subliminal. *Semiotic Inquiry*, 41, 9-30.
- Kim, C.-J., & Lee, S.-K. (2005). The characteristics of socio-scientific norms and discourses in the science classrooms: Case studies of beginning teachers. *The Korean Society for the Study of Teacher Education*, 22(3), 359-386.
- Kim, J. Y., Choe, S. U., & Kim, C. J. (2016). The effects of cogenerative dialogues on scientific model understanding and modeling of middle school students. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 37(4), 243-268.
- Kimbell, R., Stables, K., Wheeler, T., Wosniak, A., & Kelly, V. (1991). The assessment of performance in design and technology: The final report of the APU design and technology project 1985-1991. School Examinations and Assessment Council, SEAC.
- Latour, B. (1987). *Science in action: How to follow scientists and engineers through society*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Lee, C. E., & Kim, H. B. (2016). Understanding the role of wonderment questions related to activation of conceptual resources in scientific model construction: Focusing on students' epistemological framing and positional framing. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 36(3), 471-483.
- Lee, D. S. (2009). Sign, object And being. *Journal of East-West Communication Council*, 12, 91-118.
- Lee, J., Noh, T., & Lee, S.-K. (2017). The characteristics of instrumental genesis appearing in the processes of high school students' school scientific inquiries. *Journal of The Korean Association For Science Education*, 37(6), 971-980.
- Lee, K.-J., Lee, K.-H., Lee, J.-C., & Kim, J.-H. (1989). A study on the improvement of science education with experimental model and it's programming (I). *Journal of the Korean Association for Science Education*, 9(2), 13-27.
- Lee, S. (2000). The nature and structure of experimentation: Epistemic approach founded on theory-network. (Doctoral dissertation). Seoul National University, Seoul.
- Lee, S. (2004). *Philosophical understanding of doing experience*. Korea: Seokwangsa.
- Lee, S. (2009). *Phenomena and instruments*. Korea: Hanul academy.
- Lee, S. (2015). Materiality of science technologized. *Journal of the Society of Philosophical Studies*, 111, 123-148.
- Lee, S., Kim, C. J., Choe, S. U., Yoo, J., Park, H., Kang, E., & Kim, H. B. (2012). Exploring the patterns of group model development about blood flow in the heart and reasoning process by small group interaction. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 32(5), 805-822.
- Lee, S.-K. (2006). The patterns and the characteristics of students' Interactive argumentation in the small-group discussions. *Journal of the Korean Chemical Society*, 50(1), 79-88.
- Lee, S.-K., Yu, E.-J., Choi, J.-R., Kim, C.-J., Han, H.-J., & Shin, M.-K. (2010). Exploring science teacher' epistemological understanding of science and science teaching and learning. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 30(2), 218-233.
- Lopes, J. B., & Costa, N. (2007). The evaluation of modelling competences: Difficulties and potentials for the learning of the sciences. *International Journal of Science Education*, 29(7), 811-851.
- 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.
- MOE (Ministry of Education) (2015). 2015 Revised science national curriculum. Ministry of Education.
- Morris, C. (1946). *Signs, language and behavior*. N.Y.: Prentice-Hall Inc.
- Nagel, E. (1960). Logic without metaphysics. *Philosophy*, 35(132).
- NGSS Lead States (2013). *Next Generation Science Standards: For states, by states*. Washington, DC: The National Academies Press.
- No, J. H. (1996). The effects of the engineering model and science model on the children's science achievement and the science-related attitude. (Unpublished master's theses). Korea National University of Education.
- Park, H., Choi, J., Kim, C., Kim, H. Yoo, J., Jang S., & Choe, S. (2016). The change in modeling ability of science-gifted students through the co-construction of scientific model. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 36(1), 15-28.
- Park, M Y. (2014). The division of calculation and experiment in the mathematical proof - with priority given to Wittgensteins LFM and RFM -. *Philosophical Investigation*, 36, 121-146.
- Passmore, C., & Svoboda, J. (2012). Exploring opportunities for argumentation in modelling classrooms. *International Journal of Science Education*, 34(10), 1535-1554.
- Polanyi, M. (1958). *Personal knowledge: Towards a post-critical philosophy*. Chicago: University of Chicago Press.
- Pruitt, S. L. (2014). The next generation science standards: The features and challenges. *Journal of Science Teacher Education*, 25(2), 145-156.
- 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). Netherlands: Springer.
- Roth, W. M., & Bowen, G. M. (1994). Mathematization of experience in a grade 8 open-inquiry environment: An introduction to the representational practices of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 31(3), 293-318.
- Roth, W. M., & McGinn, M. K. (1998). *Inscriptions: Toward a theory of representing as social practice*. *Review of Educational Research*, 68(1), 35-59.
- Schwarz, C. V. (2009). Developing preservice elementary teachers' knowledge and practices through modeling-centered scientific inquiry. *Science Education*, 93(4), 720-744.
- Song, J., Kang, S.-J., Kwak, Y., Kim, D., Na, J., Do, J.-H., Park, S. C., Son, Y.-A., Son, J. W., Oh, P. S., Lee, J.-K., Lee, H. J., Ihm, H., Jeong, D. H., Joung, Y. J., & Kim, J. (2019). Developing performance expectations, school implementation strategies, evaluation indicators of the Korean Science Education Standards (KSES) for the next generation. Seoul: KOFAC.
- Suppes, P. (1962). Models of data. In E. Nagel, P. Suppes, & A. Tarski (Eds.), *Logic, methodology and philosophy of science: Proceedings of the 1960 international conference* (pp. 252-261). Stanford: Stanford University Press.
- Thagard, P. (2012). *The cognitive science of science*. The MIT Press.
- Wertsch, J. V. (1991). *Voices of the mind: A sociocultural approach to mediated action*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Wolcott, H. (1994). *Transforming qualitative data: Description, analysis, and interpretation*. London: Sage.
- Yang, C. H., Kim, S. Y., Jo, M. J., & Noh, T. H. (2016). The characteristics of group and classroom discussions in the scientific modeling of the particulate model of matter. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 36(3), 361-369.
- Yeu, H. (2016). Natures and principles of meaning interpretation in qualitative research: Based on the hermeneutics of Heidegger and Gadamer. *Anthropology of Education*, 19(4), 1-40.

## 저자정보

김관영(서울대학교 학생)  
이종혁(서울대학교 객원연구원)  
최진현(서울대학교 학생)  
전상학(서울대학교 교수)  
이선경(서울대학교 책임연구원)