



## 과학교육에서 모델 및 모델링에 대한 고찰 - 메타모델링 지식을 중심으로 -

조혜숙<sup>1</sup>, 남정희<sup>1\*</sup>, 오필석<sup>2</sup>

<sup>1</sup>부산대학교, <sup>2</sup>경인교육대학교

### A Review of Model and Modeling in Science Education: Focus on the Metamodeling Knowledge

Hye Sook Cho<sup>1</sup>, Jeonghee Nam<sup>1\*</sup>, Phil Seok Oh<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Pusan National University, <sup>2</sup>Gyeongin National University of Education

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received 25 July 2016

Received in revised form

10 August 2016

27 January 2017

Accepted 6 March 2017

##### Keywords:

model, modeling, metamodeling knowledge, nature of model, multiplicity of model, purpose of model, modeling process, evaluation of model, revision of model

#### ABSTRACT

The purpose of this study is to examine metamodeling knowledge and its components, which means knowledge about model and modeling required for students and teachers for successful application of modeling in the field of science education based on research literature. For this, we analyzed and categorized major previous studies on modeling and modeling through research literature methods. Metamodeling knowledge aims to recognize models and modeling and is the most crucial element to create a scientific model in scientific modeling practice. The point of view of metamodeling knowledge proposed in this study is categorize nature of model, multiplicity of model, purpose of model, modeling process, and evaluation and revision of model. Students should be able to achieve more in-depth understanding through the awareness of the nature of the model. The development of metamodeling knowledge can facilitate students' science learning.

## I. 서론

과학교육의 중요한 목표로 간주되는 과학적 탐구 능력은 학습자 스스로 과학 지식을 재구성하여 능동적으로 새로운 지식을 생성할 수 있는 능력을 의미한다. 과학교육에서는 이를 함양시키기 위한 방법으로 다양한 교수학습에 대한 제안이 있어 왔는데 최근 들어 주목 받고 있는 방법이 모델을 강조한 교수학습이다. 모델은 과학교육에서 과학적 탐구와 소양의 핵심적인 요소이면서 과학적 사실에 대해서 의사소통을 할 수 있는 과학적 과정이다(Morrison & Morgan, 1999; Schwarz *et al.*, 2009).

과학 교수학습에서 강조되는 모델의 중요성과 함께 우리나라의 과학교육에서도 모델이 강조되어왔다. 2009 개정 교육과정에서는 구체적 모델을 활용한 수업방법과 과학 개념의 이해를 제시하였으며, 2015 개정 교육과정에서도 모델의 중요성을 강조하고 모델을 특수한 내용영역, 즉 실험 모델, 원자 및 이온 모형이나 입자 모형 등의 교수 학습에 활용할 것을 제시하고 있다(Ministry of Education, 2015). 미국 과학교육 표준(National Science Education Standards, NSES)에서는 학생들이 갖추어야 할 역량으로 과학 지식을 나타내는 능력, 논리적 추론 능력, 분석, 다른 사람들의 결과에 질문을 하고 판단하는 능력 등을 제안하면서 이러한 역량을 기르기 위해서 자신만의 모델이나 이론을 형성하는 연습이 필요함을 강조해왔다(NRC, 1996).

모델에 대한 선행연구를 살펴보면 모델의 정의를 다음의 두 가지 측면으로 구분하고 있다. 첫째는, 실제 세계의 사실과 속성, 자연적 현상이나 과정의 주요한 특징에 초점을 맞추므로써 계를 추상화하고 단순화하는 표상(Chamizo, 2013; Grosslight *et al.*, 1991; Schwarz *et al.*, 2009)으로 정의하는 측면이고, 둘째는 자연현상에서 관찰한 것과 추상적인 개념이나 이론을 연결하여 구체화한 설명(Cha, Kim & Noh, 2004; Chi, Feltovich & Glaser, 1991; Gilbert, 2008; Gilbert, Boulter & Rutherford, 1998; Ha, Lee & Kang, 2009; Halloun, 1996; Hestenes, 1987; Kim & Kim, 2007; Oh, 2007, 2009; White, 1993; Treagust, Chittellborough & Mamiala, 2002)으로 보는 측면이다. 이러한 두 가지 측면의 모델의 정의는 모델이 무엇인지를 의미하는 모델의 본성을 모두 포함시킨 것은 아니다. 모델의 정의는 계(system)의 중요한 특성을 명백하게 만들기 위해서 또는 과학적 현상을 이해하고 설명하기 위해서 물체, 실제, 현상을 단순화하여 나타난 표상으로 이해되어야 한다(Chamizo, 2013; Gobert & Buckley, 2000; Morrison & Morgan, 1999; NRC, 2012). 이러한 관점에서 모델은 자연계에서 일어나는 현상에 대한 설명을 목적으로 현상을 여러 양식의 표상을 사용하여 나타난 것으로 정의할 수 있다.

미국 과학교육의 최신 경향인 차세대를 위한 과학교육 표준(Next Generation Science Standards, NGSS)에도 모델의 두 가지 측면을 모두 반영하여, 과학교육의 중요한 목표로 학생들이 스스로 증거에

\* 교신저자 : 남정희 (jhn@pusan.ac.kr)  
http://dx.doi.org/10.14697/jkase.2017.37.2.0239

바탕을 둔 모델을 만드는 능력을 설정하고, 이러한 모델은 현상과 과학 이론을 연결할 수 있는 과학적 설명방법의 하나라고 강조했다. 이를 위해서는 학생 스스로 지식을 습득할 수 있는 실천을 위해서는 학생들에게 모델과 친숙해질 기회를 제공하는 것이 중요한데, 그 이유로 모델은 표상과 설명의 측면을 모두 가지고 있기 때문에 과학적 지식의 개발에 중요한 역할을 한다고 밝히고 있다(NGSS Lead States, 2013).

모델링은 자연 현상에 대한 설명을 위한 표상인 모델을 만들어내는 과정으로, 반복적인 과정을 통하여 가장 적합한 모델로 발달시키는 것을 의미한다. 모델링은 자연 현상에 대한 내적 표상인 ‘정신 모델’을 외적 표상인 ‘표현된 모델’로 발전시키는 과정을 포함하여 학생들이 자신의 정신 모델을 시험하고 이해한 것을 스스로 살펴보고 의사소통을 통해 반성할 수 있는 기회를 제공한다(Gilbert, Boulter & Rutherford, 1998; Jonassen, Strobel & Gottdenker 2005; Schecker, 1993; Windschitl, Thompson & Braaten, 2008). 이렇듯 모델링은 자연 현상에 대한 설명과 예측을 위하여 모델의 정교화 및 표현화를 포함하여 모델의 설명력의 향상을 위한 평가, 수정이라는 과정을 통해(Clement, 2000; Justi & Gilbert, 2002) 새로운 지식의 형성 및 정교화(Halloun, 1996; Koponen, 2007), 개념적 변화 및 추론을 촉진하기 위한 교육과정이자 교수법이며, 과학의 주요 산출물인 동시에 교수방법에서 중요한 요소로 간주된다(Kim *et al.*, 2013; Mandinach & Cline, 1993).

이와 같이 모델과 모델링은 최근 과학교수학습에서 많은 관심을 받고 있지만(Böttcher & Meisert, 2011; Schwarz *et al.*, 2009), 일부 연구에서는 과학수업에서 이를 이용한 수업이 제대로 이루어지지 못하고 있음을 지적하고 있다(Gil-Perez, 1996; Jang, Ko & Kang, 2012; Treagust, Chittleborough & Mamiala, 2002). 과학수업에서 모델은 단지 보여주기 위한 목적으로만 사용되거나 학습자가 만들기 보다는 과학자가 이미 만들어 놓은 모델을 보고 익히는 형태로 수업에 사용되어 왔는데(Raghavan & Glaser, 1995), 이는 모델의 표상적 측면만을 강조한 것을 의미한다. 최근에는 이와는 다르게 학습자의 지식구성과 사고전략을 강조하는 구성주의적 과학교육의 관점에서 학생들이 스스로 모델을 만드는 모델링 과정을 적용하여 학생이 참여하는 모델링 과정이 학습에 있어서 주도적인 역할을 할 수 있음을 보여주는 여러 연구 결과가 제시되었다. 이러한 연구를 구체적으로 살펴보면, 과학적 모델의 사회적 구성과정에서 나타나는 소집단 활동 특징을 분석하여 소집단의 모델 생성 시 협력 유형의 변화를 밝히거나(Shim *et al.*, 2015), 과학적 글쓰기를 바탕으로 소집단과 과학수업에서 이루어지는 의사소통인 논의에 기반을 두는 모델링 전략을 개발 및 적용하여 모델링 능력의 변화에 효과가 있다고 밝히고 있다(Cho, & Nam, 2014; Cho, Nam & Lee, 2014). 이러한 연구들은 모델의 표상적 측면 외에도 설명적 측면의 중요성을 제시한 연구라고 할 수 있다. 모델은 자연계에서 일어나는 현상에 대한 설명을 목적으로 표상을 사용하여 나타낸 것으로 정의할 수 있으므로 이 연구에서는 모델과 모델링을 표상과 설명을 모두 포함하는 포괄적인 측면에서 사용한다.

모델과 모델링이 과학교육에서 갖는 중요성과 함께 연구가 진행되고 있음에도 불구하고, 학생과 교사 모두 이에 대해 명확하게 인식하지 못하여 과학수업에 이를 제대로 적용하는데 어려움을 겪고 있다

(Jang, Ko & Kang, 2012; Treagust, Chittleborough & Mamiala, 2002)고 보고한 연구도 있다. 대부분의 학생들은 모델을 실제 대상에 대한 복제품으로 생각하여 실체와 모델을 구별하기 어려워하고, 모델의 목적을 제대로 인식하고 못하고 있다(Cha, 2004; Crawford & Cullin, 2004; Gilbert, 1991; Harrison & Treagust, 2000; Grosslight *et al.*, 1991; Lim, 2005; Treagust, Chittleborough & Mamiala, 2004). 과학 교사들은 과학적 모델에 대해 제대로 인식하지 못하고 있으며, 과학 내용에 대한 교수에서 모델이 유용하다고 여기지만 학생들의 모델링 활동을 지도하는 방법에 대해서 제대로 인식하지 못한다(Justi & Gilbert, 2002). 또한 교사들이 모델과 모델에 관한 학생들의 생각과 능력에 대해 잘 모르기 때문에 실제 교수활동에 적극적으로 반영하고 있지 못하고 있다(van Driel & Verloop, 1999, 2002). 우리나라의 경우에도 예비 교사들을 대상으로 과학적 모델에 대한 인식 조사를 실시한 결과, 예비 교사들이 모델의 본성에 대한 인식이 부족하다고 보고하였다(An & Kim, 2011; Jeong & Kim, 2014; Oh, 2009).

과학수업에서 모델과 모델링의 성공적인 사용을 위해서는 학생과 교사 모두 모델과 모델링의 지식에 대한 명확한 이해가 선행되어야 한다. 모델과 모델링에 대한 지식을 의미하는 메타모델링 지식은 과학 이해의 본성이고(Lederman, 2007), 모델링 실습에서 학생들이 생산적으로 참여할 수 있도록 도와주는 필수 요소이기 때문에 그 중요성이 강조되고 있다(Schwarz *et al.*, 2009). 이러한 점에서 과학을 배우는 학생들은 모델의 사용 목적, 모델의 장점과 약점 등을 바르게 이해할 필요가 있다(Abd-El-Khalick *et al.*, 2004).

메타모델링 지식이라는 용어는 Schwarz(2002) 논문에서 처음 제시되었으며, 이후 Schwarz와 White(2005)는 과학에 대해 정확한 인식론의 개발을 위해 메타모델링 지식이 필요하다고 언급하면서, 메타모델링 지식의 범주에 모델의 본성과 목적을 포함시켰다. Schwarz 등(2009)은 메타모델링 지식이 모델링의 발달을 위해 필요하다고 보고, 메타모델링 지식에 모델의 본성, 모델의 목적, 모델의 평가 및 수정을 위한 기준을 포함시켰다. Davis *et al.* (2008)은 메타모델링 지식이 교사의 교육내용학적 지식에 포함되어야 한다고 주장하면서, 모델에 대한 메타모델링 지식과 모델링 실습에 대한 메타모델링 지식으로 구분하여 포함시켰다. Grosslight *et al.* (1991)은 메타모델링 지식이라는 용어를 직접적으로 제시하지 않았지만, 학생들의 모델 이해 수준을 평가하기 위한 요소로 모델의 종류, 다양한 모델의 사용, 모델의 목적, 모델의 설계 및 창작, 모델의 변경을 제시하였다. 그러나 이 연구를 포함하여 대다수의 선행 연구에서 학생들의 메타모델링 지식을 모델과 모델링을 평가하기 위한 요소로 제한하여 제시하여 수업의 전략적 측면에서는 이를 고려하지 않거나(Zhang *et al.*, 2006) 메타모델링 지식의 구성요소 중 일부만을 언급하고 있다(Gobert *et al.*, 2011; Grünkorn *et al.*, 2014; Justi & Gilbert, 2002, 2003; Krell, Reinisch & Krüger *et al.*, 2014; Schwarz, 2002; Treagust, Chittleborough & Mamiala, 2002). 과학교육에서 메타모델링 지식은 과학에 대한 이해를 위한 필수 요소(Henze, van Driel & Verloop, 2007)로 간주되고 있다. 그러나 메타모델링 지식은 학생과 교사 모두에게 가장 부족한 개념(Krell, Reinisch & Krüger, 2014)이기 때문에 과학 학습을 위한 모델링 실습에서 이를 경험할 수 있는 기회를 제공해야 한다.

현재까지 모델과 모델링에 대한 연구는 과학 교수학습에서 모델에 대한 인식조사나 모델링에 대한 전략 개발, 혹은 적용 후 효과를 알아

보는데 그쳤다. 과학교육에서 모델과 모델링을 적용할 때, 학생들이 자연 현상에 대해 자신만의 설명을 만들기 위한 표상인 모델을 만들고 의사소통을 통해서 평가와 수정을 통한 모델을 개발하기 위해서는 메타모델링 지식에 대한 이해가 선행되어야 하며, 교사가 조력자로서 학생들을 도와주고 참여를 이끌기 위해서는 메타모델링 지식에 대한 이해를 바탕으로 교수학습 전략을 완성할 수 있어야 한다. 이러한 메타모델링 지식에 대한 이해는 학생과 교사 모두에게 모델과 모델링에 대한 이해를 높일 수 있는 가장 기본적인 요소이며, 실제 국내·외 선행연구에서도 메타모델링 지식이 모델과 모델링에 대한 이해를 향상시킨다는 결과를 찾아볼 수 있다(Bogiages, 2014; Ha, Lee & Kang, 2009; Jang, Ko & Kang, 2012; Yoon, 2011).

따라서 이 연구에서는 모델과 모델링에 대한 이해를 높이기 위해 선행연구들을 메타모델링 지식의 관점에서 살펴보고 이를 범주화하여 구체적으로 제시하고자 한다. 이를 통해 과학학습을 위한 모델링 실습에서 학생들과 교사들이 모델과 모델링에 대해서 느끼는 어려움을 해결하고, 학생들의 과학과 모델에 대한 이해를 높일 수 있는 과학 교수학습 전략을 성공적으로 적용하기 위한 시사점을 찾을 수 있을 것이다.

## II. 연구 방법

이 연구의 목적은 선행 연구를 바탕으로 하여 과학교육의 현장에서 모델과 모델링의 성공적인 적용을 위해 필요한 학생과 교사에게 요구되는 모델과 모델링에 대한 지식을 의미하는 메타모델링 지식과 그 구성요소에 대해서 고찰하는 것이다. 이를 위해 모델과 모델링에 대한 주요 선행 연구들을 분석하고 범주화하였으며, 과학교육에서 효과적으로 적용하기 위한 시사점을 도출하였다.

이 연구의 주된 연구방법은 문헌연구(literature review)이다. 메타모델링 지식의 구성요소에 대한 연구물을 살펴보기 위해 국외 논문의 경우, 7개의 SSCI 학회지 International journal of science education, Journal of research in science teaching, Science education, Research in science education, International journal of science and mathematics education, Science and education, Journal of science education and technology에서 모델과 모델링을 키워드로 하여 검색한 논문과 구글에서 모델 및 모델링 관련 논문을 검색한 자료와 이들 논문의 참고문헌에서 추출한 논문을 검색하여 수집하였다. 또한 국내 논문의 경우, 학술지인 한국과학교육학회지, 대한화학회지, 초등과학교육학회지, 한국지구과학학회지, 한국생물교육학회지 등에서 모델, 모델링, model, modeling을 키워드로 하여 검색하였고, 한국교육학술정보원(<http://www.riss.kr>)의 통합검색에서 같은 방법으로 관련 논문을 수집하였다. 이후, 메타모델링 지식(metamodeling knowledge)이라는 용어를 키워드로 위와 동일한 과정으로 검색하여 관련 논문을 검토하고(Davis *et al.*, 2008; Schwarz, 2002; Schwarz *et al.*, 2009; Schwarz & White, 2005), 이들 논문들의 참고문헌을 분석하였다. 이들 학회지 외에 수집된 국내 및 국외 학술 논문과 학회에서 구두 및 포스터 발표 자료, 학위 논문, 2차 자료인 보고서 및 서적 등은 기타로 범주화하였다. 이중에서 모델과 모델링이라는 용어가 들어있지만, 모델이라는 용어가 학습 모델, 수업 모델, 탐구 모델, 창의성 모델, 역할 모델 등의 특정 수업 모델과 관련된 연구와 개념변화를 위한 정신모델 관련 연

구는 배제하였다. 또한 모델이나 모델링을 전략을 언급하고 있으나 그 변화결과를 제대로 파악하기 어려워 적용을 시도하지 못하는 유아를 대상으로 한 문헌은 분석에서 배제하였다. 따라서 메타모델링 지식의 구성요소에 대한 연구와 모델과 모델링에 대한 이론적 배경이 될 수 있는 연구, 초·중·고등·예비교사를 포함한 대학생과 교사를 대상으로 한 문헌을 분석 대상 문헌으로 하여 최종적으로 231편을 선정하였다(Table 1).

Table 1. Number of references in a literature review

학회지명	연구물수
International journal of science education	63
Journal of research in science teaching	17
Science education	13
Research in science education	12
International journal of science and mathematics education	9
Science and education	4
Journal of science education and technology	4
한국과학교육학회지	33
대한화학회지	7
초등과학교육학회지	7
한국지구과학학회지	3
한국생물교육학회지	3
기타	56
합	231

이 연구에서는 선정된 모델과 모델링에 대한 선행연구를 메타모델링 지식의 관점에 근거한 분석하여 메타모델링 지식의 하위요소를 제시하고, 이러한 요소들이 갖는 속성을 분석하였다. 그 결과 모델과 모델링에 대한 연구는 크게 두 방향으로 정리할 수 있다. 첫째, 메타모델링 지식의 정의에 대한 연구로, 메타모델링 지식이 무엇인지에 대한 연구이다. 둘째, 메타모델링 지식에 대해 직접적으로 언급하지 않았지만 하위 요소를 제시한 연구로, 메타모델링 지식의 요소를 모델의 본성, 모델의 다양성, 모델링 과정, 모델의 목적, 모델의 평가 및 수정으로 범주화하고 그 특징에 대한 연구이다.

이 연구에서 진행된 연구방법의 절차는 Figure 1과 같이 도식화할 수 있다. 분석은 과학교육 박사과 과학교육 전문가 2인이 참여하여 총 3인이 분석하여 타당성을 확보하였다.

다음에서는 위에서 제시한 연구방법에 따라 모델과 모델링에 대한 선행연구에서 메타모델링 지식에 대한 정의를 나타내고, 메타모델링 지식을 범주화하여 5가지 하위 요소로 분류하고 그 특징을 제시하였다.

## III. 연구 결과

### 1. 메타모델링 지식(Metamodeling knowledge)과 범주

메타모델링 지식은 모델과 모델링에 대해 인식하는 것을 포함하여 어떻게 모델이 사용되고, 왜 사용되는지에 대한 이해와 함께 모델의 강점과 약점을 아는 것이며 과학적 모델을 만드는데 가장 결정적인 메타인지적 지식이다(Schwarz, 2002; Schwarz *et al.*, 2009; Schwarz &

연구 내용	연구 방법	비고
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 연구 주제 및 연구문제 선정</li> <li>● 키워드 검색을 통한 관련 연구물 수집</li> </ul>	문헌조사	
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 연구주제 및 분류, 배제기준에 의한 연구물 231편 선정</li> </ul>	예비 내용 분석가 협의회	분석가 2인
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 내용 분석을 위한 메타모델링 지식의 정리</li> <li>● 선정된 관련 연구물에 대한 내용 분석 및 타당성 검증</li> </ul>	본 내용 분석(1차)	분석가 2인
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 메타모델링 지식의 구성요소 도출 및 범주화 작업</li> </ul>	본 내용 분석(2차)	분석가 3인
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 메타모델링 지식의 구성요소에 대한 내용 분석 결과 타당성 검증</li> <li>● 종합해석 및 논의사항 도출</li> </ul>	본 내용 분석(3차)	분석가 3인

Figure 1. Research procedures

White, 2005). 또한 메타모델링 지식은 과학이 어떻게 작동하고 어떻게 만들어지는지에 대한 지식의 본성이며(Schwarz *et al.*, 2009), 과학적 모델의 개발뿐만 아니라 모델의 본성에 대한 명확한 이론적 지식을 포함한 것으로 모델링 실습에서 필수적인 지식이다(Schwarz & White, 2005).

이러한 메타모델링 지식은 모델링 실행에서 필요한 여러 요소를 종합적으로 연결하는 능력이기 때문에 여러 연구자들은 메타모델링 지식의 중요성을 강조하면서 이와 관련하여 모델에 관한 메타개념적

지식(metaconceptual knowledge about models), 메타-개념 모델링 지식(meta conceptual modeling knowledge), 메타-표상 능력(meta-representational competence), 모델링 차원의 매트릭스(Matrix of Modelling Dimensions), 모델 역량(model competence)라는 용어를 사용하였다(Crawford & Cullin, 2005; Krell, Reinisch & Krüger, 2014; Schwarz, 2002). 특히 교사의 모델링에 대한 교과교육학적 지식의 측면을 강조하면서 이를 모델의 인식론(epistemologies of model)이라고 부르기도 한다(Gobert & Pallant, 2004).

Table 2. Components of metamodeling knowledge through a literature review

연구자	구성요소	모델의 본성	모델의 다양성	모델의 목적	모델링 과정	모델의 평가 및 수정
Grosslight <i>et al.</i> (1991)		모델의 종류	다양한 모델	모델의 목적	모델의 설계 및 만들기	모델의 수정
Treagust, Chittellborough & Mamiala (2002)		정확한 복제품으로써의 과학적 모델	다양한 표상으로써의 과학적 모델	설명적 도구으로써의 모델 과학적 모델이 사용되는 방법		과학적 모델의 본성 수정
Justi & Gilbert (2002)		새 모델을 구성에 대한 학습		모델의 재구성에 대한 학습		모델이 수정되는 방법에 대한 학습
Schwarz (2002)		모델의 본성		모델의 유용성	모델링 과정	모델의 평가
Justi & Gilbert (2003)		본성 실체	특이성	사용 예측 인증		시간
Crawford & Cullin (2005)			같은 것을 나타내는 다양한 모델	모델의 목적	모델의 설계 및 만들	모델의 수정 모델의 타당성/조사
Schwarz & White (2005)		모델의 본성		모델의 목적이나 유용성	모델링의 본성 또는 과정	모델의 평가
Schwarz <i>et al.</i> (2009)		모델의 본성		모델의 목적		모델의 평가 및 개선에 대한 기준
Sins <i>et al.</i> (2009)		모델의 본성		모델의 목적	모델링 과정	모델의 평가
Gobert <i>et al.</i> (2011)		정확한 복제품으로써의 모델	다양한 표상으로써의 모델	과학적 모델의 유용성		모델의 본성의 수정
Oh & Oh(2011)		모델의 의미	과학적 모델의 다양성	모델링의 목적 과학교실에서 모델의 사용		과학적 모델의 수정
Krell, Upmeier zu Belze, & Krüger (2012)		모델의 본성	다양한 모델	모델의 목적		모델 시험 모델 수정
Grünkorn <i>et al.</i> (2014)		모델의 본성	다양한 모델	모델의 목적		모델 시험 모델 수정
Krell, Reinisch & Krüger (2014)		모델과 원형사이의 관계	모델과 원형의 차이점			모델 시험 모델 수정에 대한 이유

우리는 선행 연구들을 분석하여 모델과 모델링에 대한 연구에서 메타모델링 지식의 관점에 대한 통찰을 얻고자 한다. 선행 연구물들은 메타모델링 지식에 대한 정의와 필요성을 제시해 주는 등 연구 자료의 분석 기준과 기본 방향을 정립시켜 주는 역할을 하였는데, 대표적으로 Grosslight 등(1991)이 있다. 메타모델링 지식이라는 용어를 직접적으로 제시하지 않았지만, 학생들의 모델 이해 수준을 평가하기 위한 요소로 모델의 종류, 다양한 모델의 사용, 모델의 목적, 모델의 설계 및 창작, 모델의 변경을 제시하여 메타모델링 지식의 요소를 언급한 시초가 된 연구이다. 이와 같이 메타모델링 지식의 요소를 제안한 선행 연구를 통해서 메타모델링 지식의 요소를 중심으로 한 분석 관점에 대한 기준을 마련할 수 있었다. Table 2는 메타모델링 지식을 범주화하고 구성요소에 대한 추출 근거를 정리한 표이다.

Table 2에서 보듯이 연구자마다 모델과 모델링의 이해 및 모델링 실습을 위한 필수적인 지식의 요소를 다르게 보거나 혹은 같은 의미이지만 용어를 다르게 제시하거나 또는 그 의미를 함축하여 모델링 실습에 포함시켜 사용하는 등 지식의 요소 중 일부를 제시하였다. Grosslight 등(1991)을 비롯한 대부분의 연구자들은 메타모델링의 구성요소로 모델의 본성, 모델의 목적, 모델의 변경을 공통적으로 제시하였지만, 모델링 과정을 그 요소로 보지 않고 간과한 연구가 많았다. 이에 반해 메타모델링 지식은 모델에 대한 지식과 모델링에 대한 이해로 구성된다고 제시하면서 모델링 과정을 강조한 연구가 있다(Grünkom *et al.*, 2014). 모델링 과정은 모델과 모델링에 대한 교수학습에서 교사들의 필수 지식이고 학생들의 학습 효과를 위해서 반드시 필요한 것이다(NRC, 2012; Schwarz *et al.*, 2009; Valanides & Angeli, 2008). 따라서 교사와 학생이 모델과 모델링을 제대로 이해하고 모델링 실습에 적용하기 위해서는 이러한 지식들을 종합적이고 구체적으로 살펴볼 필요가 있다. 이러한 필요성에 의해서 이 연구에서 살펴본 메타모델링 지식의 구성요소를 크게 모델에 대한 지식과 모델링에 대한 지식으로 구분하고, 이를 구체적으로 5가지의 하위 요소로 나누어 살펴보았다(Table 3).

Table 3. Components of metamodeling knowledge

메타모델링 지식의 종류		의미
모델에 대한 지식	모델의 본성	· 모델은 무엇인가?
	모델의 다양성	· 같은 현상 또는 대상에 대한 다른 모델이 있는가? · 하나의 현상에 대해 다양한 표상으로 나타낼 수 있는가?
모델링에 대한 지식	모델의 목적	· 모델은 무엇을 위한 것인가? · 모델은 학생에게 왜 필요한 것인가? · 모델은 과학수업에서 어떤 역할을 하기 위한 것인가?
	모델링 과정	· 모델링은 어떠한 순서로 이루어지는가?
	모델의 평가 및 수정	· 여러 모델들을 비교하여 더 나은 모델을 판단할 수 있는가? · 모델을 수정할 수 있는가?

‘모델에 대한 지식’은 모델의 본성과 모델의 다양성을 포함한다. 모델의 본성은 모델이 무엇을 나타낸 것인지와 모델이 어떻게 표현되었는지를 이해하는 것을 의미하고(Schwarz & White, 2005, Zhang

*et al.*, 2006), 모델의 다양성은 각 모델이 대상의 특별한 측면만을 나타내어 제한점을 가지고 있기 때문에 대상에 대해 완전한 설명을 제공하기 위해서는 다양한 모델이 필요하다는 것을 아는 것이다(Halloun, 2007; Schwarz & White, 2005). 모델에 대한 지식을 의미하는 이 두 가지를 배우기 위한 학습 목표는 다음 세 가지가 있다. 학생들은 모델이 실제 세계에서 일어나는 현상에 대한 단순화한 표상이며, 물체, 사건, 과정의 정확한 복제품이 아님을 알아야 한다(Schwarz & White, 2005, Zhang *et al.*, 2006). 그 다음으로 학생들은 여러 모델이 같은 현상을 나타낼 수 있고 주어진 현상을 설명하기 위해 다양한 모델이 존재함을 알아야 한다. 마지막으로 학생들은 각 모델들의 종류의 범위를 알아야 한다. 이 세 가지 목표 중 첫 번째 것은 모델의 본성과 연관이 있고 나머지 두 가지는 모델의 다양성과 연관이 있는 것이다.

‘모델링에 대한 지식’은 과학적 모델의 목적, 모델링 과정, 모델의 평가 및 수정의 기준을 포함한 것으로, 학생들이 과학적 추론에서 모델을 보다 성공적이고 반성적으로 사용하도록 안내해주는 역할을 한다(Schwarz *et al.*, 2009; Schwarz & White, 2005). 모델의 목적은 과학자들이 자연 현상을 설명하거나 예측하기 위해 모델을 만드는 것임을 학생들이 아는 것으로, 모델은 추상적인 현상에 대하여 학생들의 사고를 유발하고 이해를 도와주기 때문에 학생들은 모델을 구성하고 사용함으로써 과학적 이해를 명확하게 할 수 있게 된다. 모델링 과정은 과학 학습을 위한 하나의 실천 방법이기 때문에 학습의 목적에 따라 모델링 과정을 모델을 표현하는 방법인 표상, 의사소통 등의 교수학습에서 강조하는 관점에 따라 다르게 실습될 수 있음을 이해하는 것이다. 이러한 모델링 과정에 대한 이해를 통해 학생들은 모델의 대상과 모델을 정확하게 알 수 있다(Harrison & Treagust, 1996). 모델의 평가 및 수정은 모델이 현상에 대한 증거에 기반을 두고, 목적과 관련된 의미형성과 의사소통의 기능을 포함시킨 것이다. 모델의 평가는 학생들이 이론 및 증거에 근거한 것이 모델이라는 것을 알고, 모델을 설명하기 위한 내용적 측면인 과학적 지식과 관찰한 현상에 대한 증거가 얼마나 완전하고, 통일성을 가지는지와 그 모델이 다른 모델 및 이론들과 일관성을 가지는지에 근거하여 평가하는 것이다. 모델의 평가 다음에 이루어지는 모델의 수정은 학생들이 현상을 정확하고 일관성 있게 설명하거나 예측하는데 실패할 수 있기에 자신의 모델을 수정해야 함을 인식하는 것이다.

과학수업에서 메타모델링 지식은 교육학적 목적을 가진 모델링 실습의 필수적인 부분이고 이러한 요소를 통합적으로 연결시켜 주는 것이다(Abd-El-Khalick *et al.*, 2004; Lederman, 2007; Schwarz *et al.*, 2009). 또한 메타모델링 지식은 과학적 모델의 본성을 포함한 모델 자체에 대한 이해와 함께 실제 세계에 대한 지식을 향상시키기 위한 강력한 도구와 실습으로써 모델과 모델링의 목적에 대한 이해를 포함한다. 또한 모델의 목적에 맞게 모델에 대한 평가와 수정 기준에 대한 지식을 통해서 학생 스스로 자신과 다른 학생들의 모델을 평가하고 수정할 수 있어야 한다. 또한 교사들도 모델에 대한 이해를 위해서는 메타모델링 지식이 필요하다.

## 2. 메타모델링 지식의 구성요소

메타모델링 지식은 모델의 본성, 모델의 다양성, 모델의 목적, 모델

링 과정, 모델의 평가 및 수정이라는 5가지 요소로 이루어져 있다. 과학수업에서 학생과 교사가 모델과 모델링을 제대로 이해하고 성공적으로 적용하기 위해서는 메타모델링 지식의 구성요소에 대해 체계적으로 알아야 한다. 이러한 구성요소에 대해 이해하고 혼합하여 모델을 인식하고, 만들고, 적용하고, 평가하는 것이 메타모델링 지식인 것이다.

가. 모델의 본성

모델은 자연 현상에서 보이지 않거나 접근할 수 없는 과정 및 특성을 나타낸 것이기 때문에 실제와는 다른 제한점을 가지게 된다. 이렇듯 모델의 본성은 모델이 무엇인지에 관해 알고, 모델이 가지는 특성이나 한계 등을 이해하는 것으로, 과학교육에서 과학적 소양을 기르기 위해서는 그 기본적인 요소인 모델의 본성에 대한 이해가 선행되어야 한다(Gilbert, 1991; Gobert & Buckley, 2000; Justi & Gilbert, 2002). 선행연구에서 많은 연구자들이 모델의 본성과 중요성을 언급하였으나 그 정의만 언급하는데 그치거나 이에 대한 구체적인 설명을 제시하지 않은 한계가 있었다. 따라서 과학교육에서 학생과 교사의 모델과 모델링을 적용할 때 이해를 돕기 위한 모델의 본성을 구체적으로 이해하여야 한다. 이러한 관점에서 이 연구에서는 선행연구를 분석하여 모델의 본성을 다음의 8가지로 요약하였다.

첫째 모델은 관찰한 현상이나 계를 간단하게 혹은 단순하게 나타내는 간단화(simplification)한 것이다(Gilbert, 2008; Morrison & Morgan, 1999). 둘째 모델은 자연 현상이나 계의 모든 특징을 포함하는 것이 아니라 어떤 중요한 사실을 분리하여 이론으로 함축화(abstraction)한 것이다(Portides, 2007). 이 둘은 모두 실제 상황의 문맥에서 문제, 잘 모르는 물체, 현상, 계를 의미하는 ‘대상(target)’과 이 대상의 이해를 돕기 위한 자료, 친숙한 물체, 현상, 계를 의미하는 ‘기초(base)’인

모델 사이의 구조적 유사성에 바탕을 두고 연결시킨 비유에 기반을 둔다(Sins, Savelsbergh & van Joolingen, 2005). 셋째 모델은 자연 현상이나 계에 대한 개념, 과정, 상호작용에 대해 여러 가지 양식으로 나타내는 표상화(representation)한 것이다(Windschitl, Thompson & Braaten, 2008; Glynn & Duit, 1995). 이는 자연 현상이나 계의 중요한 특징이나 추상적 개념을 시각화하는 것을 포함하는데, 이러한 시각화와 시각적 소양 기술은 화학 교육 및 지구 과학교육(Pibum *et al.*, 2002)에서 중요한 요소이다. 넷째 모델은 현상의 작용과 그 요소가 어떻게 상호작용하는지에 대한 가설을 추측하거나 모델과 현상 사이의 관계를 정교화하는 추론(reasoning)이다(Schecker, 1993). 다섯째 모델은 모델의 요소와 관계에 대한 학습자의 생각을 수학적 형태로 표현하는 정량화(quantification)한 것이다(Hestenes, 1987). 여섯째 모델은 관찰한 자연 현상이나 계를 분해하여 모델의 중요한 요소를 확인하고 연구하는 분석(analysis)이다. 이는 일곱째 해석(interpretation)으로 이어지는데, 해석은 모델의 변인의 결과 및 경험적 자료를 해석하여 그 관계를 밝히는 것이다(Hogan & Thomas, 2001; Morrison & Morgan, 1999; Vosniadou, 1994). 여덟째 설명(explanation)은 모델의 요소들의 관계를 확인하여 하나의 요소가 다른 요소를 변화시키는 원인에 대해 증명하는 것이다(Sins, Savelsbergh & van Joolingen, 2005 재인용). 즉, 설명은 인과 관계의 수준에서 실제 세계의 측면을 이해하는 것을 도와주는 진술문이며, 학습자는 모델을 통해 과학적 아이디어에 대해 조사하거나 수정함으로써 아이디어를 구체화하고(Windschitl, Thompson & Braaten, 2008) 현상을 전체로서 종합할 수 있게 된다(Stratford, Krajcik & Soloway, 1998)가 포함된 것이다. 이러한 관점에 따라 여러 연구자들이 밝힌 모델의 속성을 Table 4와 같이 제시하였다. 또한 이 연구에서 각 모델의 본성을 충족하기 위한 학생 활동을 제안하였다.

이와 같이 모델의 본성에 대한 이해를 통해서 학생과 교사 모두

Table 4. Nature of model

	정의	학생 활동
간단화 (Simplification)	· 복잡한 현상의 간단화(Rouse & Morris, 1986) · 특별한 목적에 대해 관찰할 수 있는 실제에 대한 복제품의 구성(Gilbert, 2004)	· 학생들은 현상의 관계를 간단하게 나타내기
함축화 (Abstraction)	· 현상이나 계에 대해 어떤 중요한 특성을 분리하거나 선택하여 일부 특성을 포함(Chamizo, 2013)	· 학생들은 현상의 특별한 특성을 함축하기
표상화 (Representation)	· 계의 현상에서 관찰할 수 있는 요소에 대한 언어적, 시각적, 구체적인 표상(Forbes, Zangori & Schwarz., 2015; Mendonca & Justi, 2013).	· 학생들은 자신의 정신 표상을 외적 표상의 여러 양식(언어적, 시각적, 물질적)으로 표현하거나 이러한 양식들을 통합하여 나타내기
추론 (Reasoning)	· 계의 부분들을 어떻게 인과적 또는 상관적으로 연결되는지에 대한 탐색(Zhang <i>et al.</i> , 2006) · 모델의 요소들이 어떻게 상호작용하고 행동하는지에 대해 추측하여 가설을 생성(Sins, Savelsbergh & van Joolingen, 2005)	· 학생들은 모델에서 포함되어야 할 관계를 선택하고, 어떤 것들을 포함시키거나 배제할지에 대해 논의하기
정량화 (Quantification)	· 특성의 변화를 기술 또는 수학적 방정식으로 변환(Hestenes, 1993) · 타당성과 신뢰도를 높이기 위한 관계의 명백화(Nisbett & Wilson, 1977).	· 학생들은 모델의 양적 표현을 위해 수학적 형태로 보다 정확하게 나타내기
분석 (Analysis)	· 계와 현상에 대한 부분으로의 분해(Zhang <i>et al.</i> , 2006) · 변수, 대상, 요소를 확인, 선택, 생성(Sins, Savelsbergh & van Joolingen, 2005) · 결론의 도출 또는 비평(Sins, Savelsbergh & van Joolingen, 2005)	· 학생들은 대상, 요소, 변수의 값에 대해 이야기하거나 결론에 대해서 논의하기
해석 (Interpretation)	· 변수들이 시간에 따른 변화의 확인(Hogan & Thomas, 2001)	· 학생들은 변수들의 변화의 결과를 표나 그래프로 나타내기
설명 (Explanation)	· 모델의 부분들이 인과적이나 상관적으로 어떻게, 왜 관련되어 있는지에 대한 명백화(Sins, Savelsbergh & van Joolingen, 2005; Windschitl, Thompson & Braaten, 2008)	· 학생들은 자신의 아이디어나 설명을 지지하기 위해 논리적으로 논의하기 · 학생들은 ‘왜냐하면’이라는 단어를 사용하여 관계가 어떻게, 왜 그런지 나타내기



모델이 무엇인지에 대해 알게 되고, 과학수업에 모델링을 적용할 때 가질 수 있는 강점과 한계점에 대해 명확히 인식하게 된다(Jang, Ko & Kang, 2012, Yoon, 2011).

### 나. 모델의 다양성

같은 현상을 설명하기 위해 여러 모델이 존재한다는 모델의 다양성을 이해하기 위해서는 모델의 분류에 대해서 알아볼 필요가 있다. 왜냐하면 모델의 다양성과 그 범주에 대한 이해를 통해서 과학적 모델을 이용한 교수 학습의 기반을 마련하게 되고(Boulter & Buckley, 2000), 서로 다른 과학적 모델과 그 대상을 비교함으로써 과학적 모델을 만드는 과정을 분석이나 과학적 모델의 대상이 되는 현상이나 아이디어를 이해하는 데 도움을 주기 때문이다(Boulter & Buckley, 2000). 특히 모델의 여러 가지 종류에 대한 이해는 모델-기반 추론, 개념 변화, 체계적인 사고, 학습의 중요한 측면과 관련이 있기 때문에 중요하다(Raghavan & Glaser, 1995; Richards, Barowy & Levin, 1992; White & Frederiksen, 1998).

앞에서 언급한 것과 같이 모델은 관찰한 같은 현상에 대해 어떠한 표상으로 나타내는가와 이러한 현상을 설명할 수 있는가에 따라 그 정의가 달라졌다. 표상적 관점에서 모델은 마음속에 아이디어를 상호 연결한 내적 표상인 정신 모델과 이에 대한 외적 표상인 개념 모델, 물질 모델, 표현된 모델로 분류할 수 있다(Cartier & Stewart, 2000; Gobert & Buckley, 2000). 이에 반해 설명적 관점에서는 모델은 관찰한 현상에 대한 자신의 설명을 다른 사람과 공유하는 과정을 통한 합의에 중점을 두어 분류할 수 있다(Gilbert, 2004).

#### (1) 표상적 측면에 따른 분류

모델의 정의에서 표상의 측면이 강조되었는데, 이러한 표상은 내적 표상과 외적 표상으로 구분하여 모델을 나눌 수 있다. ‘내적 표상(internal representation)’은 특별한 자연 현상에 기초하여 예측할 수 있는 패턴, 법칙, 설명적 구조를 나타내기 위해 외부 세계와의 상호작용을 통해 형성되는 것이고, 이를 ‘정신 모델(mental model)’이라고 한다(Cartier & Stewart, 2000; Gobert & Buckley, 2000; Greca & Moreira, 2002; Johnson-Laird, 1980). 이러한 정신 모델의 특징은 새로운 지식, 아이디어, 개념 외에도 개인적인 지각, 경험, 상상, 이해에 근거하여 만들어진 것이기 때문에 내적, 특이적, 비형식적, 인식적, 불완전적, 불안정적, 변하기 쉬운 특성을 갖는다(Greca & Moreira, 2000; NRC, 2012). 그러나 정신 모델은 학생들이 가지고 있는 세계관에 의해서 제한되어 자신의 신념에 따라 사용되거나 발전되고(Franco & Colinviaux, 2000), 학생들이 과학 개념이나 지식을 표현하고자 할 때 그 원형으로써(Greca & Moreira, 2002) 머릿속에서 단단하게 자리 잡아 있기 때문에 바꾸기가 매우 어려우며 새로운 학습을 방해하기도 한다(Lee, 1999).

학생 스스로나 교사는 학생들의 학습의 결과를 확인하고 수정해야 하기 때문에 눈에 보이지 않는 정신 모델이 아니라 반드시 외적 표상으로 표현되어야 한다. ‘외적 표상(external representation)’은 과학적 이론인 정신 모델을 구체화시켜 표현한 것이고, 물질 모델(material model), 개념 모델(conceptual model), 표현된 모델(expressed model) 등의 이름으로 명명되기도 한다(Davis *et al.*, 2008; NRC, 2012). 이러

한 외적 표상의 중요한 점은 구체적 모델이나 글과 말로 전이됨에 따라 기억에서 처리되는 정보의 양을 줄여주어 학생들에게 불필요한 인지 부담을 줄여줄 수 있다는 것이기 때문에(Gunstone & Mitchell, 1998) 외적 표상은 ‘표현된 모델’이다(Cho, 2014). 이는 자연 현상에 대한 이해를 위한 표상으로(Ornek, 2008) 과학적 지식을 바탕으로 친숙하지 않은 것을 친숙한 것으로 바꿔주거나(Rosenblueth & Wiener, 1945) 교실에서 정의된 내용을 학생들에게 가르치기 위한 특별한 교육학적 전략을 통합한 것(NRC, 2012) 또는 학생들이나 과학자들의 커뮤니티에 의해 공유된 과학적 지식이다(Greca & Moreira, 2000). 과학교육 측면에서 모델과 모델링은 교사의 주도적인 강의로 정의되는 전통적인 교수 학습 방법의 하나의 대안이 될 수 있다. 모델링은 학습 과정에서 학생들이 각각 다르게 가진 정신 모델(Glynn & Duit, 1995)을 과학적으로 인정되는 지식에 맞는 간결하며 완전한 표상인 외적 표상으로 바꾸는 과정을 통해 자신의 이해를 정교화할 수 있게 되고, 이것은 ‘정신 모델의 발전(progression)’이다(Buckley & Boulter, 2000; Redish, 1994; Schwarz & Gwekwerere, 2007; Snow, 1990).

이러한 관점에 따라서 표현된 모델 안에서 다중 표상의 양식과 방법에 따라 모델을 분류할 수 있다. Chamizo(2013)은 모델의 표현 방법에 따라 식, 법칙, 원소, 화합물을 포함하여 과학 언어로 나타나는 ‘기호적 모델’, 장치나 기구, 이미지, 분자모형, 도표, 축소모형을 포함하는 ‘모상적 모델’, 실제 세계의 특정한 측면에 대해 실험을 수행하는 ‘실험적 모델’로 나누었다. 실험적 모델은 이론적 모델을 실험하기 위해 설계된 것이기 때문에, 그 기능은 질문에 대한 자료 모델을 연결시키는 분석적 기술과 관련 있는 자료의 종류를 특징짓거나 예측하는 것과 추상적인 실체를 시각화하는 것이다(Francoeur, 1997). 이러한 분류에서 실험 모델은 실험의 수행을 의미하는 것이며, 실험이라는 과정을 거쳐 나온 결과를 분석·해석을 한 후, 다양한 표상의 양식을 사용한 표현된 모델로 나타내게 된다. 또한 행동적 모델을 구두로 설명하면서 병행되어 나타나는 양식이기에 단순히 행동적 모델이라고 분류하기 어렵다. 이렇듯 여러 학자들이 말한 모델의 분류는 관점에 따라 하나의 범주가 다른 범주에 포함되기도 하고, 여러 범주를 하나로 묶을 수도 있다(Cho, 2014). 따라서 모델을 다중 표상의 양식을 기준으로 하여 분류할 수 있는데, 3차원 물질 모델을 나타내는 ‘구체적 모델’, 원인 및 이유, 예(List), 일상생활의 경험 및 비유를 글로 진술한 ‘언어적 모델(읽고 들을 수 있는 모델)’, 사진, 그림, 표, 그래프의 ‘시각적 모델’, 원자기호, 화학식, 특정한 양의 단위, 화학반응식의 ‘기호적 모델’, 신체의 움직임을 나타내는 ‘행동적 모델’로 분류하였다(Boulter & Buckley, 2000; Cho, 2014).

#### (2) 설명적 측면에 따른 분류

학습자는 개인적인 사고를 ‘표현된 모델’로 나타낸 자신의 설명을 다른 사람과 공유하고 집단 내에서 논의를 통한 설득과 반박을 통해 합의에 이를 수 있다. 이렇듯 모델은 설명이 집단 내에서 이루어지는 합의의 정도에 따라 크게 합의가 이루어지기 전인 개인적 모델과 합의가 이루어진 합의된 모델로 분류할 수 있다. 이에 더 나아가, Gilbert(2004)는 집단 내에서 합의의 정도에 따라 모델을 표현 모델부터 혼합 모델로 분류하였고, 이후 연구자들은 여기에다 과학수업에서 이루어지는 교수를 위해 바뀐 교수법적 모델(pedagogical model

Table 5. Classification of scientific model

Model 종류		설명		
표상적 측면	설명적 측면		설명	
내적 표상 (Internal representation)	개인적 모델 (Personal or idiosyncratic model)	정신 모델 (Mental model)		· 개인에 의해 형성된 개인적인 표상
		표현된 모델 (Expressed Model)	표현 모델 (Expressed model)	· 다른 사람과 상호작용 하기 위해 하나 또는 그 이상의 표상의 방식의 사용을 통해 나타난 모델
합의 모델 (Consensus model)	· 정신 모형이 학급과 같은 사회적 그룹에서 동의를 얻는 공공인 영역에 놓인 모델 · 표현 모델이 과학자의 사회적 집단 안에서 토의 및 실험을 통해 가치가 있다는 것에 합의를 이끌어 낸 모델			
과학적 모델 (Scientific model)	· 합의 모형이 과학자 공동체에 의해 공식적인 실험 검증을 따라 승인을 얻은 모델 예) 원자의 Schrödinger 모델, 에이즈 바이러스, 반도체의 p-n 접합			
역사적 모델 (Historical model)	· 과학적 모델이 특정한 역사적 맥락들에서 생산되고 후에 많은 연구 목적들에 대해 대체된 모델 예) 원자의 보어 모델, 생물의 창조론 모델, 전기 전도도의 옴의 법칙			
교육과정 모델 (Curricular model)	· 과학적 모델이나 역사적 모델이 학습을 위해서 정규적인 교육과정에 포함 되도록 단순화를 거친 모델 예) 원자의 Lewis-Kossel 모델의 dot-and-cross 버전			
교수 모델 (Teaching model)	· 교육과정 모형을 학습을 지지하기 위해 교사나 학생이 과학적 모형이나 역사적 모형에서 대상을 이해하기 위해 만든 모델 예) 원자를 태양 행성 시스템으로 설명하는 것			
혼합 모델 (Hybrid model)	· 여러 가지 역사적 모형의 특징을 혼합한 모델 · 과학적 모형이나 역사적 모형이 탐구 영역 속에서 교육과정 모형들 각각의 몇 가지 특징들이 합쳐지면서 형성된 모델			
외적 표상 (External representation)	합의된 모델 (Consensus model)	Didactical models, Pedagogical model (교수법적 모델)	· 교실 활동 중에 교사들에 의해 사용되고 과학의 본성과 과학 교수의 본성과 학습의 본성과 관계있는 모델 · 보다 발전된 아이디어를 만들고 문제해결방법을 촉진시키기 위해 사용되는 것으로 수식화를 포함한 모델	

or didactical model)을 추가하였다(Adúriz-Bravo, 2013; Harrison & Treagust, 2000; Oh & Oh, 2011).

Table 5에서 외적 표상의 범위에 들어간 표현된 모델부터 교수법적 모델은 모두 개인이 가진 내적 표상인 정신 모델을 여러 가지 표상을 사용하여 나타난 표현된 모델로 분류할 수 있다. 이를 표상적 관점과 통합하여 ‘표현된 모델’을 협의의 이르는 커뮤니티의 크기나 의미, 교육적 목적에 따라 구체적으로 분류할 수 있다.

다. 모델의 목적

모델의 목적에 대해서 아는 것은 모델에 대한 이해를 포함하여 과학적 추론을 위한 학습, 즉 과학수업에서 학습자들이 모델의 성공적인 사용할 수 있도록 안내하는 것이다(Schwarz, 2002; Schwarz & White, 2005). 이를 위해 Schwarz와 White(2005)는 모델의 목적을 모델 자체가 무엇을 위한 것인지, 학생들에게 왜 필요한 것인지와 과학수업에서 역할은 무엇인지의 세 가지 측면으로 나누었다. 이에 근거하여 세 가지 측면에서 모델의 목적을 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

(1) 모델은 무엇을 위한 것인가?

모델은 자연 세계에 대한 자신의 관찰과 경험을 바탕으로 하여

구체적인 자연 현상과 추상적인 개념 사이 또는 실제 세계와 과학적 이론을 연결(connection)하기 위한 것이다(Cha, Kim & Noh, 2004; Gilbert, 2004; Oh, 2009). 구체적으로 살펴보면, 모델은 자연 현상의 물리적 실체와 과정의 관점에서 다양한 표상의 양식으로 나타냄으로써 복잡하고 추상적 관계를 명백하게 나타내거나 가시적으로 표현하기 위한 것이다(Kozma & Russell, 1997). 이는 모델 정의의 표상적 측면과 연결된 것으로 표상화를 통해 질적·양적 사고와 의사소통을 촉진시킬 수 있다(Talanquer, 2011). 또한 모델은 과학적 현상과 이에 대한 과정 및 관찰한 것을 토대로 하여 서술하거나 과학적 아이디어를 구체화한 진술문의 형태로 나타내기 위한 것으로(Gilbert, Boulter & Rutherford, 1998), 이러한 모델 정의의 설명적 측면을 통해서 사고의 정교화가 가능하다(Gilbert, Boulter & Rutherford, 1998). 따라서 모델은 학생들이 관찰한 자연 현상과 관련된 이론을 연결시키기 위한 것이다.

(2) 모델은 학생에게 왜 필요한 것인가?

학생들은 모델의 사용을 통해 현상과 경험, 이론을 보다 포괄적으로 이해(understanding)할 수 있게 된다. 이는 자연 현상에 대한 학습이나 개념 형성을 위해 상황을 제공하여 학생들이 개념을 쉽게 알도록 도와주는 것을 의미한다. 학생들은 자신이 이해한 것을 모델로 표현하는 ‘의미 형성’을 통해 자신의 개인적 패러다임의 형성을 돕고



자연 현상과 사고를 명확하게 하거나(Odenbaugh, 2005; Schwarz *et al.*, 2009), 과학적 현상에 대해 예측할 수 있게 된다(Gilbert, 1991; Gosslight *et al.*, 1991; Schwarz *et al.*, 2009; Treagust, Chittleborough & Mamiala, 2004). 또한 모델은 학생들이 자신이 구성한 새로운 지식을 다른 사람과 공유할 수 있게 해주는 의사소통(communication)에서 중요한 역할을 한다(Böttcher & Meisert, 2011; Campbell, Oh & Neilson, 2012; Everett, Otto & Luera, 2009; Kim, 2013; Passmore & Svoboda, 2012). 즉, 모델은 물리적 현상에 대해 과학적으로 생각하고 이야기하는 기회를 제공함으로써 학생들이 어떤 과학개념을 표현하고자 할 때 다른 사람을 설득하기 위해 다양한 형식의 모델을 사용함으로써 표현과 의견을 나누는 과정이 훨씬 용이해질 수 있는 것이다.

(3) 모델은 과학수업에서 어떤 역할을 하기 위한 것인가?

모델은 과학자와 학생들이 자연 현상에 대한 아이디어를 만들거나 시험할 수 있는 생산물이자 틀(Gilbert, 2004; Windschitl, Thompson & Braaten, 2008)이므로 학생들은 모델을 통해서 사고를 공유 또는 재구성하거나 발전시킬 수 있다(Devi *et al.*, 1996; Gilbert, Boulter & Rutherford, 1998; Luisi & Thomas, 1990). 또한 자신이 만든 모델의 장점 및 약점에 대해 다른 사람들의 비평과 논의를 받으면서 자신과 다른 사람들의 아이디어를 공유하거나 실제 세계에서 관찰한 것과 관련된 과정, 사건, 구조의 체계로서 표현한 아이디어를 조사하거나 증거에 기반을 두어 그 타당성을 평가할 수 있게 된다. 이를 통해 학생들은 자신의 생각을 다른 사람들에게 설득하거나 다른 사람이 현상을 이해하도록 돕거나 집단의 합의를 발달시킬 수 있다(Penner, 2001; Schwarz *et al.*, 2009). 학생들은 자신이 만든 모델을 주어진 상황에서 보다 잘 묘사하거나 설명 및 예측하기 위해서 반성하거나 수정함으로써 사고를 재구성하고 발전시킬 수 있다. 이에 더 나아가, 모델은 학생들뿐만 아니라 과학자 및 공학자들에게 설계된 문제에 대해 생각의 도구를 제공하여 가능한 해결책을 개발(development of solutions)할 수 있도록 해준다(NRC, 2012).

모델의 목적은 지식의 발전(development of knowledge)을 위한 것이다. 모델은 과학적 지식을 만들고 보급하고 승인하는데 필수적이며, 학생이 교육에서 지식의 본성을 이해하고 주제에 대해 전문적인 지식을 발전시키도록 도와주어 과학적 설명력을 향상시키고 과학적 내용으로 전이시킬 수 있게 해준다(Gilbert, 1991; Halloun, 1996). 이러한 이유로 과학교육에서 교육적 도구로(educational tool) 모델이 사용되는 것이다(Raghavan & Glaser, 1995). 모델은 과학적 지식을 형성하

는 중심 요소이면서 과학적 소양을 가르치는 데 효과적 수단이다(Gilbert, 1991; Halloun, 2007). 교수 학습 과정에서 교사들은 과학적 사실에 대한 설명을 하기 위해서 혹은 실제, 연구나 교수의 도구(Gilbert, 2004; Gosslight *et al.*, 1991; Justi & Gilbert, 2003)로써 모델을 사용한다. 또한 학생들이 관찰하거나 경험하기 어려운 과학적 현상이나 시간 및 안전상의 제약이 따르는 교실에서 재생할 수 없는 것들에 대한 모델을 통한 설명으로 과학 학습에 대한 흥미를 유발하고 학생들이 과학 개념을 쉽게 접근하게 됨으로써 학습의 효과가 있을 수 있게 된다(Kim & Kim, 2007; Kim *et al.*, 2001).

라. 모델링 과정

모델링 과정에 대한 학습이 중요한 이유는 학생들에게 모델 개발 및 사용 과정에서 모델의 과정을 안내하지 않고 모델의 본성이나 목적만을 설명하려고 하는 것은 학생들에게 큰 효과가 없기 때문이다(Schwarz *et al.*, 2009). 또한 모델의 구성과 사용을 포함하여 과학의 본성 및 탐구에 대한 지식과 모델링 과정에 대한 이해는 교사 지식의 중요한 요소이지만(NRC, 2012; Valanides & Angeli, 2008), 모델링 과정에 대한 교사의 지식은 제한적이다(NRC, 2012; Valanides & Angeli, 2008). 이러한 관점에서 교사의 역할은 학생들이 모델링 과정을 이해하도록 돕고, 각 모델의 표상에 대해 학습하도록 하며, 모델링을 이용한 학급내 담화를 통해 증거에 기반한 논의로 학생들의 사고를 증진할 수 있도록 하는 것이다(Harrison & Treagust, 1996; Passmore, Stewart & Cartier, 2009).

여러 연구자들은 기본적으로 모델링 과정에서 모델을 만들고 평가하고, 수정하여 적용하는 것으로 제시하였다(Clement, Rea-Ramírez & Mimez-Oviedo, 2008, Gobert *et al.*, 2011). 이러한 기본적인 모델링 과정에서 표상적 측면과 설명적 측면을 강조하여 모델링 과정의 단계를 제시하였다(Table 6).

(1) 표상적 측면의 모델링 과정

과학교육에서 과학적 모델에 대한 적용은 다중 표상에 대한 이해를 통해서 이루어질 수 있다. 왜냐하면 과학적 모델은 과학적 개념을 의사소통하기 위해 나타난 표상적 도구이고(Romberg, Carpenter & Kwako, 2005), 이들 표상은 언어적, 시각적, 물리적, 물질적인 측면의 다중표상을 포함하기 때문이다(Gilbert & Boulter, 1997; Gobert & Buckley, 2000; Windschitl, Thompson & Braaten., 2008), 따라서 다중

Table 6. Modeling process

구분	모델링 과정 명칭	단계
표상적 측면을 강조한 모델링 과정	모델링 수업 과정(Brewe, 2008)	도입 및 표상 → 표상의 조직 → 적용의 도입 → 적용 → 요약화 및 일반화 → 지속적인 개발
	논의 기반 모델링(Cho, 2014)	다중 표상의 이해 → 다중 표상에 대한 활동의 이해 → 논의를 통한 모델링의 이해
설명적 측면을 강조한 모델링 과정	모델링 Toolkit (Windschitl & Thompson, 2013).	소그룹의 모델 → 학급 전체의 합의 모델의 구성 → 모델 수정의 도구로써 포스트잇이나 문장의 활용 → 설명 체크리스트의 활용 → 요약된 표 작성
	모델 수정 기술(Stewart <i>et al.</i> , 1992)	그룹의 현상의 관찰 → 그룹사이의 경험의 공유 → 그룹에서 설명 모델의 설계 → 다른 그룹 비평에 대한 반박 → 그룹에서 합의가 될 때까지 수정

표상에 대한 올바른 이해는 모델링 실습을 성공으로 이끌 수 있으며, 학생들이 표상을 이해하도록 하기 위해서는 표상의 해석, 표상의 진이, 표상에 대한 정신적 조작이라는 세 가지가 필요하다(Kozma & Russell, 1997). 앞에서 언급했듯이 학생들이 사고활동을 전개할 때, 의미론적 표상과 시각적 표상을 동원하여 현재의 사고과정에 대한 내적 표상 체계를 형성하게 된다. 여기에서 시각적 표상의 두 가지 존재론적 형태 중 개인이 정신적으로 구성한 내적 표상을 ‘정신 모델’이라고(Gilbert, 2008)라고 한다. 또한 더 나아가 작동기억 내에서 이 두 유형의 정보를 체계적으로 통합하여 현재의 현상을 인식하는 내적 표상을 ‘정신 모델’이라고 하기도 한다(Johnson-Laird, 1980). 의미론적 표상과 시각적 표상으로 구성된 이러한 정신 모델은 특정 시간에 특정 상황에 대한 정지된 이미지와는 달리 동영상으로 보는 것과 같은 방식으로 간주되기도 한다(Franco & Colinvaux, 2000). 이와 같이 학생들의 표현의 원형이 되는 ‘정신 모델’은 시각적 표상을 많이 사용하게 되는 것이다. 또한 이러한 정신 모델을 의사소통을 위해 나타낸 ‘표현된 모델’은 시각적 표상 외에도 물질적, 언어적, 기호적 표상 등의 여러 가지 다중표상을 사용하여 나타내야 한다. 따라서 정신 모델에 대한 이해와 이를 표현된 모델로 바꾸는 전 과정을 아우르는 모델링에서는 학생들의 다중표상의 사용 능력이 중요하다.

(2) 설명적 측면의 모델링 과정

모델은 자연 세계의 사물이나 사건들의 관계성을 설명하기 위한 기능을 가지고 있다. 모델은 자신이 만든 모델을 다른 사람에게 전달하거나 공유하고, 자신의 모델을 다른 사람들에게 설명하여 설득하거나 다른 사람들이 만든 모델을 평가하게 된다. 이와 같이 자신의 모델을 만들거나 수정하는 정교화과정을 통해서 모델링 과정에 대한 이해를 향상시킬 수 있다(Böttcher & Meisert, 2011; Campbell, Oh & Neilson, 2012; Passmore & Svoboda, 2012). 특히 모델링 과정에서 일어나는 논의 활동은 주장에 대한 타당함을 입증하고 그것을 바탕으로 상대방을 설득하는 과정을 수반하며, 여러 가지 대안적인 모델들의 상대적인 장점을 비교하여 가장 적절한 것을 선택하는 것이다(Berland & Reiser, 2008; Böttcher & Meisert, 2010; Osborne & Patterson, 2011). 결국 모델링은 의사소통을 기반으로 하여 만들고 평가하고 수정하는 과정의 반복을 통해서 모델의 질을 향상시킬 수 있다. 모델링에서 물리적인 모델과 개념적 및 메타인지를 연결시킬 수 있는 기회를 제공받음으로써 학생들은 긍정적인 태도와 인지 이해가 향상될 수 있다(Penner *et al.*, 1997). 또한 학생들은 자신들의 모델을 구성하고 비평하면서 자신들의 개념적 결과의 발전을 가져올 수 있다(Abell & Roth, 1995).

모델링은 논의 활동을 통한 설명과 설득과 같은 담화 행위를 수반하고 있다. 과학에서의 논의 활동은 모델에 관한 비판적인 평가 과정

이며, 이 과정을 통해 학생들은 자신의 설명에 대한 설득력이나 적절성을 높이기 위해 증거를 제시하는 능력을 키울 수 있다(Böttcher & Meisert, 2011). 학생들은 모델링을 통해서 모델 생성의 동기를 유발하는 문제에 대해 질문을 만드는 단계로부터 같은 현상에 대한 여러 모델들을 평가하는 단계에 이르는 모든 모델링 과정에서 자기 자신이나 다른 사람들이 모델에 관해 설득하고 자신의 모델에 대한 생각을 확고히 하는 활동에 참여하여 과학적 지식을 사용하여 문제를 해결한다(Passmore & Svoboda, 2012).

이렇듯 모델링 과정은 현상에 대한 초기 설명을 제안하고, 자신의 설명을 조사하고 수정하며, 학급 구성원끼리 일시적인 모델을 공유하고 토론하는 것이다. 학생들의 모델링 과정을 통한 교실 구성원 사이의 상호작용에 따라 과학적 지식에 대한 이해의 정도가 달라질 수 있는데, 이는 모델링 과정에서 일어나는 과학적 논의를 통해 과학의 본성과 과학 개념에 대한 학습을 촉진하기 때문이다(Mendonca & Justi, 2013). 따라서 모델링 과정의 학습효과는 학습자가 스스로 지식을 구성하고 다른 사람과 공유하는 등의 의사소통을 통해서 재구성함으로써 생성효과를 가진다고 볼 수 있다(Lee *et al.*, 2015). 학생들은 모델링의 의사소통을 통해서 자신의 문제 해결 과정을 언어로 명료화하게 되고, 다른 학생들의 모델과 살펴보고 자신의 모델에서 잘된 점과 잘못된 점을 비교하여 성찰하게 된다. 학생들은 자신의 정신 모델보다 뛰어난 학습자들의 정신 모델과 비교하여 수정하는 동료학습(peer learning)의 효과를 얻게 된다(Kim, 2013).

마. 모델의 평가 및 수정

모델 평가의 목적은 주어진 현상을 보다 잘 묘사하고 설명하기 위한 것으로 이는 모델의 수정을 가능하게 한다(Sins, Savelsbergh & van Joolingen, 2005). 모델의 평가는 논의과정을 통해 자신의 모델의 장점 및 약점에 대한 분석과 비평을 통해 자신의 생각을 공유하고 다른 사람들에게 현상의 행동을 설명하는 것이다. 모델의 수정은 주어진 상황을 보다 잘 묘사하고 설명하기 위해 모델을 수정하는 것으로 자연 현상과 자신의 설명 사이의 적합한 정도를 평가하는 과정으로 학생들이 증거에 바탕을 두거나 읽거나 다른 사람들과의 논의를 통해서 자신의 설명을 바꾸는 것이다(Hogan & Thomas, 2001; Windschitl & Thompson, 2013). 이와 같이 모델을 평가하는 과정에서 다른 사람의 의견을 듣게 되면서 모델의 수정이 이루어지게 되고, 이러한 점진적인 과정을 통해 모델이 정교화되기 때문에 모델링에서 이루어지는 모델의 평가는 과학적 탐구와 의사소통에서 필수불가결한 부분이다(Morrison & Morgan, 1999). 모델의 평가와 수정에 대한 정의와 이를 위한 학생 활동을 Table 7에 제시하였다.

Table 7. Evaluation and revision of model

	정의	학생 활동
평가 (Evaluation)	· 경험적으로 확인된 패턴이나 모델의 결과사이의 일치도를 평가하기 (Sins, Savelsbergh & van Joolingen, 2005)	· 학생들은 자신의 가설을 조사하거나 자신의 모델을 평가하기
수정 (Revision)	· 주어진 상황에서 보다 좋은 설명을 하기 위해서 모델의 부분을 수정하기 (Sins, Savelsbergh & van Joolingen, 2005) · 자신의 모델과 실험에서 얻어진 자료가 일치하는지 결정하기 (Sins, Savelsbergh & van Joolingen, 2005) · 모델의 질을 판단하는 전문문을 포함하기(Zhang <i>et al.</i> , 2006)	· 학생들은 활동, 읽기, 논의를 통해 얻은 증거로 모델을 수정하기 · 학생들은 과학적 지식의 발전 과정에서 모델을 수정하여 향상하기

#### IV. 결론 및 제언

이 연구는 모델과 모델링에 대한 이해를 높이기 위해 이에 관한 선행연구를 메타모델링 지식의 관점에서 살펴보고, 이를 범주화하여 구체적으로 제시함으로써 과학학습을 위한 모델링 실습에서 학생들과 교사들에게 모델과 모델링에 대한 이해를 높이고 어려움을 해결할 수 있는 방안을 제시하는 것이다. 모델에 대한 정의는 자연 현상을 포함한 계에 대한 사실과 과정에 대해 추상화하고 단순화한 표상과 관찰한 것과 과학적 이론을 연결한 과학적 설명의 두 가지 측면을 모두 포함하고 있다. 이러한 모델과 모델을 만들고 평가하고 수정하면서 자신의 설명을 재구성하는 과정을 일컫는 모델링은 과학교육에서 학생들이 이해한 것을 표현하고 의사소통하고 반성할 수 있는 기회를 제공함으로써 과학적 지식의 구성하도록 하기 때문에 중요성이 커지고 있다. 과학교육에서 모델링이 갖는 중요한 목적은 다음의 세 가지로 요약할 수 있다(Hodson, 1993, 2014; Mendonca & Justi, 2013). 첫째, 과학의 학습(learning of science) 측면에서 학생들은 모델링을 통해 과학의 산물인 모델의 이해를 통해 과학에 대한 개념적 지식을 개발하고 습득할 수 있는 기회를 얻게 된다. 둘째, 과학에 대한 학습(learning about science) 측면에서 학생들은 과학의 역사적·철학적·방법론적 개념과 과학적 언어에 대한 이해를 개발하기 위해 모델링을 통해 자신의 모델을 만들고 실험할 수 있다. 셋째, 과학을 하는 방법의 학습(learning how to do science) 또는 과학의 실행(doing science) 측면에서 학생들은 과학적 지식의 습득이라는 목표를 위해 모델링을 통해 과학적 탐구 및 문제해결에 주체자로서 참가하여 과학적 탐구인 모델의 역할을 인식할 수 있다. 이렇게 과학의 학습과 실행을 위한 학습자 중심의 교수-학습 방법의 대안이 모델과 모델링이고, 이때 필요한 메타모델링 지식은 과학교육의 주체인 교사와 학생들에게 과학을 이해하고 과학적 소양을 키우기 위한 기본 요소이기 때문에 메타모델링 지식을 이해하고 이를 모델링을 중심으로 한 학습방법으로 활용할 필요가 있다. 그러나 모델과 모델링을 과학수업에서 적용하고자 할 때, 학생과 교사는 메타모델링 지식을 명확하게 인식하지 못하고 있다. 학생들은 모델을 자연 현상의 복사품으로 간주하거나 표상으로 표현되는 모델에 대해 이해하지 못하고 자신이 이해한 것을 과학적 개념으로 나타내지 못한다. 교사들은 이와 비슷하게 모델에 대한 이해가 미흡하고, 모델을 과학수업에서 적용할 때 필요한 전략적 측면이 부족하다. 이를 해결하기 위해서는 학생과 교사 모두에게 메타모델링 지식에 대해 이해할 수 있도록 안내하는 연구가 필요하다.

메타모델링 지식은 모델과 모델링에 대해 인식하는 것을 포함하여 어떻게 모델이 사용되고, 왜 사용되는지에 대한 이해를 의미하고, 이는 과학적 모델링 실습에서 학생들의 참여를 위한 필수적인 요소이다. 이러한 메타모델링 지식은 ‘모델에 대한 지식’과 ‘모델링 과정에 대한 지식’으로 구성되며, ‘모델에 대한 지식’은 모델의 본성과 모델의 다양성으로 이루어지고, ‘모델링 과정에 대한 지식’은 모델의 목적, 모델링 과정, 모델의 평가 및 수정의 기준으로 이루어진다. 모델의 본성은 모델이 무엇이고, 어떻게 사용되는지에 대해 이해하는 것이다. 모델의 본성에 대한 이해를 통해서 모델이 가지는 여러 가지 속성을 알게 되며 모델과 모델링에 대한 깊이 있는 이해의 틀을 가지게 된다. 모델의 다양성은 같은 자연 현상을 나타내기 위한 여러 모델이 존재하는 것과 모델의 분류에 대한 이해를 통해 체계적인 사고와 과학적 아이

디어를 알게 된다. 이와 같은 모델의 분류에는 표상적 관점에 따라 나누어 내적 표상인 정신 모델과 외적 표상인 표현된 모델로 나눌 수 있고, 이러한 이해를 바탕으로 하여 정신 모델을 표현된 모델로 나타내고 평가하고 수정하는 일련의 과정이 모델링임을 명확하게 인식하게 된다. 자연 현상에 대한 자신만의 설명이면서 의사소통의 기능을 하는 표현된 모델은 설명적 관점에서 커뮤니티 내에서 합의되는 정도에 따라 표현 모델에서부터 교육학 모델로 나눌 수 있다. 모델의 목적은 과학자들이 자연 현상을 설명하거나 예측하기 위해 모델을 만드는 것임을 알고, 왜 학습자에게 필요한지와 과학수업에서 모델의 역할에 대한 이해를 통해 학습자들이 모델을 성공적으로 사용할 수 있도록 안내하는 것이다. 모델은 관찰하기 어렵거나 위험하거나 너무 추상적이거나 하는 과정에 대해 사고하는 것을 도와서 쉽게 이해하도록 해주기 때문에 학생들은 모델을 구성하고 사용함으로써 과학적 이해를 명확하게 할 수 있게 되는 것이다. 모델링 과정에 대한 이해를 통해 학생들이 실제적으로 모델을 개발하고 사용하는데 효과를 줄 수 있으며, 교사들은 학생들에게 모델링 실습을 적용할 때 제대로 이끌 수 있게 된다. 이러한 모델링 과정은 일반적으로 개발, 평가, 수정 외에도 표상적 관점과 설명적 관점에서 치중하여 포함하고 있기도 하다. 모델의 평가 및 수정은 학생들이 관찰한 자연 현상을 잘 설명하기 위해 다른 사람과의 의사소통을 통해 모델을 수정하는 일련의 과정으로 모델을 정교하게 만드는 것을 의미한다.

이와 같이 모델과 모델링에 대해 이루어진 선행연구에 대한 고찰은 우리에게 모델링 실습에서 필요한 메타모델링 지식의 구성요소를 제시해주며, 이를 통해 메타모델링 지식의 구성요소인 모델의 본성, 모델의 다양성, 모델의 목적, 모델링 과정, 모델의 평가 및 수정에 대한 깊은 이해를 가질 수 있다. 또한 이에 대한 이해는 실제 학교 과학교육에 이를 적용하고 수행하는 학생과 교사 모두에게 필요한 것이다.

과학교육에서 과학적 소양을 기르고 학생 중심의 학습이 이루어지기 위해서는 모델과 모델링을 이용한 학습이 이루어져야 한다. 실제로 과학수업에서 모델과 모델링을 활용한 학습의 긍정적인 효과는 많은 선행연구에서 제시되었다. 과학수업에서 학생들이 모델링을 학습할 때 어떠한 이유로 긍정적인 효과가 있는지 또는 이러한 학습 효과의 원인이 무엇인지에 대한 구체적인 언급은 제시되지 않았다. 그렇기 때문에 모델과 모델링을 적용한 학습이 학생들의 인지과정의 어떠한 측면이 변화하는지에 대한 연구가 필요하다.

또한 모델과 모델링에 대한 학생들의 인식의 변화와 교수-학습에 적용 및 정착을 위해서는 교사의 변화가 선행되어야 한다. 교사들은 과학교육에서 모델링에 대한 가치에 대해 이해하지 못하거나 수업에 적용 시에도 모델 자체를 가르치는 행위에 집중하여 모델링 과정에서 작용하는 학생들의 지식, 개념, 능력에 대해서 바르게 인식하지 못하고 있다. 이를 해결하기 위해서 교사가 가져야 할 모델 및 모델링에 대한 지식에는 메타모델링 지식 이외에 과학수업에서 모델과 모델링을 적용할 때 과학적 모델링에 대한 교과교육학적 지식(PCK)이 필요하다. 이러한 PCK에는 모델링을 이용한 교수전략과 학생들의 아이디어에 대한 이해가 포함된다. 모델링에 대한 교수전략에는 모델링 실습에 참여하는 학생들에 대한 이해와 모델링 실습을 위해 필요한 메타모델링 지식의 개발을 돕는 것이 포함되며, 학생들의 아이디어에 대한 PCK에는 모델링 실습에 대한 것과 메타모델링 지식에 대한 것이 포함된다. 이를 위해서는 교사의 연수와 교사양성을 위한 교육과

정에서 모델과 모델링에 대해 배울 수 있도록 해야 하고 이에 관한 수업 자료의 개발이 필요하다. 따라서 후속 연구에서는 실제 과학수업에서 모델과 모델링을 사용하기 위해서는 교사가 가져야 할 전략적 관점에 대한 선행 연구와 실태 분석을 바탕으로 모델링에 대한 교사 교육 프로그램 등의 연구가 이루어져야 할 것이다.

**국문요약**

이 연구의 목적은 선행 연구를 바탕으로 하여 과학교육의 현장에서 모델과 모델링의 성공적인 적용을 위해 필요한 학생과 교사에게 요구되는 모델과 모델링에 대한 지식을 의미하는 메타모델링 지식과 그 구성요소에 대해서 고찰하는 것이다. 이를 위해 모델과 모델링에 대한 주요 선행 연구들을 문헌연구 방법을 통해 분석하고 범주화하였으며, 과학교육에서 효과적으로 적용을 위한 시사점을 도출하고자 하였다. 메타모델링 지식은 모델과 모델링에 대해 인식하는 것이고, 과학적 모델링 실습에서 과학적 모델을 만드는데 가장 결정적인 요소이다. 이 연구에서 제안하고자 하는 메타모델링 지식의 구성요소는 모델의 본성, 모델의 다양성, 모델의 목적, 모델링 과정, 모델의 평가와 수정으로 범주화하였다. 모델의 본성에 대한 이해를 통해서 모델이 가지는 여러 가지 속성을 알게 되며 모델과 모델링에 대한 깊이 있는 이해의 틀을 가지게 된다. 모델의 다양성은 같은 자연 현상을 나타내기 위한 여러 모델이 존재하는 것과 모델의 분류에 대한 이해를 하는 것이다. 모델의 목적은 과학자들이 자연 현상을 설명하거나 예측하기 위해 모델을 만드는 것임을 학생들이 인식하여 모델을 구성하고 사용함으로써 과학적 이해를 하는 것이다. 모델링 과정은 모델을 만들고 평가하고 수정으로 이루어진다는 것을 아는 것이다. 이를 통해 학생들이 모델링 실습에 참여할 수 있게 되고, 교사는 모델링 실습에서 학생을 돕는 제대로 된 안내자의 역할을 할 수 있게 된다. 모델의 평가 및 수정은 학생들이 관찰한 자연 현상을 잘 설명하기 위해 다른 사람과의 의사소통을 통해 모델을 수정하는 일련의 과정으로 모델을 정교하게 만드는 것을 의미한다. 메타모델링 지식의 구성요소에 대한 이해를 통해 학생들과 교사들이 모델과 모델링에 대해서 느끼는 어려움을 해결하고 과학교육에서 모델과 모델링 수업을 성공적으로 적용할 수 있는 지침을 제시할 수 있다.

**주제어 :** 모델, 모델링, 메타모델링 지식, 모델의 본성, 모델의 다양성, 모델의 목적, 모델링 과정, 모델의 평가, 모델의 수정

**References**

Abd-El-Khalick, F., BouJaoude, S., Duschl, R., Lederman, N. G., Mamlok-Naaman, R., & Hofstein, A., Niaz, M., Treagust, D., & Tuan, H. (2004). Inquiry in science education: international perspectives. *Science Education*, 88(3), 397-419.

Adúriz-Bravo, A. (2013). A semantic view of scientific models for science education. *Science and Education*, 22(7), 1593-1611.

An, Y. L., & Kim, H. J. (2011). Recognition of the nature of science by preservice science teachers on the basis of the atomic model. *Journal of the Korean Association for Research in Science Education*, 31(4), 539-556.

Berland, L. K., & Reiser, B. J. (2008). Making sense of argumentation and explanation. *Science Education*, 93(1), 26-55.

Bogiages, C. (2014). The development of a performance progression for science teachers' implementation of model-based teaching. University of South Carolina - Columbia. (Doctoral dissertation).

Böttcher, F., & Meisert, A. (2011). Argumentation in science education: a model-based framework. *Science and Education*, 20(2), 103-140.

Boulter, C. J., & Buckley C. B. (2000). Constructing a typology of model for science education. In J. K. Gilbert & C. J. Boulter (Eds.), *Developing models in Science Education* (pp. 41-57). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic.

Brewe, E. (2008). Modeling theory applied: modeling instruction in introductory physics. *American Journal of Physics*, 76(12), 1155-1160.

Buckley, B. C., & Boulter, C. J. (2000). Investigating the role of representations and expressed models in building mental models. In J. K. Gilbert & C. J. Boulter (Eds.), *Developing models in science education* (pp. 119-135). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic.

Campbell, T., Oh, P. S., & Neilson, D. (2012). Discursive modes and their pedagogical functions in model-based inquiry (MBI) classrooms. *International Journal of Science Education*, 34(15), 2393-2419.

Cartier, J. & Stewart, J. (2000). Teaching the nature of inquiry: Further developments in a High School Genetics program. *Science Education*, 9(3), 247-267.

Cha, J. H., Kim, Y. H., & Noh, T. H. (2004). Middle and high school students' views on the scientific model. *Journal of the Korean Chemical Society*, 48(6), 638-644.

Chamizo, J. A. (2013). A new definition of models and modeling in chemistry' teaching. *Science and Education*, 22(7), 1613-1632.

Chi, M. T. H., Feltovich, P. J., & Glaser, R. (1991). Categorization and representation of physics problems by experts and novices. *Cognitive Science*, 5(2), 121-152.

Cho, H. S. (2014). Development and effect of argument-based modeling strategy as teaching method in middle school students (Doctoral dissertation). Pusan national university, Korea.

Cho, H. S., Nam, J. H., & Lee, D. W. (2014). The development of argument-based modeling strategy using scientific writing. *Journal of the Korean Association for Research in Science Education*, 34(5), 479-490.

Cho, H. S., & Nam, J. H. (2014). The impact of the argument-based modeling strategy using scientific writing implemented in middle school science. *Journal of the Korean Association for Research in Science Education*, 34(6), 583-592.

Clement, J. J. (2000). Model-based learning as a key research area of science education. *International Journal of Science Education*, 22(9), 1041-1053.

Clement, J. J., Rea-Ramirez, M. A., & Mímez-Oviedo, M. C. (2008). An instructional model derived from model construction and criticism theory. In J. J. Clement, M. A. Rea-Ramirez, & Mary Anne (Eds.) (pp. 23-43). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic.

Crawford, B., & Cullin, M. (2005). Dynamic assessments of preservice teachers' knowledge of models and modelling. In K. Boersma, M. Goedhart, O. de Jong, & H. Eijkelhof (Eds.), *Research and the quality of science education* (pp. 309-323). Dordrecht: Springer.

Crawford, B. A., & Cullin, M. J. (2004). Supporting prospective teachers' conceptions of modelling in science. *International Journal of Science Education*, 26(11), 1379-1401.

Davis, E. A., Kenyon, L., Hug, B., Nelson, M., Beyer, C., Schwarz, C., & Reiser, B. J. (2008). MoDeLS: designing supports for teachers using scientific modeling. Paper presented at the Association for Science Teacher Education, St. Louis, MO, January 10, 2008.

Devi, R., Tiberghien, A., Baker, M., & Brna, P. (1996). Modelling students' construction of energy models in physics. *Instructional Science*, 24(4), 259-293.

Everett, S., Otto, C. & Luera, G. R. (2009). Preservice elementary teachers' growth in knowledge of models in a science capstone course. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 7(6), 1201-1225.

Forbes, C. T., Zangori, L., & Schwarz, C. V. (2015). Empirical validation of integrated learning performances for hydrologic phenomena: 3rd-grade students' model-driven explanation-construction. *Journal of Research in Science Teaching*, 52(7), 895-921.

Franco, C. & Colinviaux, D. (2000). Grasping mental models. In J. K. Gilbert & C. J. Boulter (Eds.), *Developing models in science education* (pp.93-118). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

Francoeur, E. (1997). The forgotten tool: The design and use of molecular models. *Social Studies of Science*, 27(1), 17-40.

Gilbert, J. K. (2004). Model and modelling: routes to more authentic science education. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 2(2), 115-130.

Gilbert, J. K. (2008). Visualization: an emergent field of practice and enquiry in science education. In J. K. Gilbert, M. Reiner, & M. Nakhleh (Eds.),

- Visualization: Theory and Practice in Science Education (pp. 3-24). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic.
- Gilbert, J. K., & Boulter, C. J. (1997). Learning science through models and modelling: in B. J. Fraser and K. Tobin, eds., *The International Handbook of Science Education* (pp. 53-66). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic.
- Gilbert, J. K., Boulter, C. J., & Rutherford, M. (1998). Models in explanations, part 1: horses for courses. *International Journal of Science Education*, 20(1), 83-87.
- Gilbert, S. W. (1991). Model building and a definition of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 28(1), 73-79.
- Gil-Perez, D. (1996). New trends in science education. *International Journal of Science Education*, 18(8), 889-901.
- Glynn, S. M., & Duit, R. (1995). Learning science meaningfully: constructing conceptual models. In S. M. Glynn & R. Duit (Eds.), *Learning science in the schools: Research reforming practice* (pp. 3-33). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Gobert, J. D., & Buckley, B. C. (2000). Introduction to model-based teaching and learning in science education. *International Journal of Science Education*, 22(9), 891-894.
- 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.
- Gobert, J. D. & Pallant, A. (2004). Fostering students' epistemologies of models via authentic model-based tasks. *Journal of Science Education and Technology*, 13(1), 7-22.
- Greca, I. M., & Moreira, M. A. (2000). Mental models, conceptual models, and modelling. *International Journal of Science Education*, 22(1), 1-11.
- Greca, I. M., & Moreira, M. A. (2002). Mental, physical, and mathematical models in the teaching and learning of Physics. *Science Education*, 85(6), 106-121.
- Grosslight, L., Unger, C., Jay, E., & Smith, C. (1991). Understanding models and their use in science: conceptions of middle and high school students and experts. *Journal of Research in Science Teaching*, 28(9), 799-822.
- Grünkorn, J., Hansch, J., Upmeyer zu Belzen, A. & Kruger, D. (2014). Assessing students' understandings of biological models and their use in science to evaluate a theoretical framework. *International Journal of Science Education*, 36(10), 1651-1684.
- Gunstone, R., & Mitchell, I. J. (1998). Metacognition and conceptual change. In J. L. Mintzes, J. H. Wandersee, & J. D. Noval (Eds.), *Teaching for science education: A human constructivist view* (pp. 133-163). San Diego, CA: Academic Press.
- Ha, J. H., Lee, H. J., & Kang, S. J. (2009). Perception of science high school students on modeling activity. *Journal of Gifted & Talented Education*, 19(1), 184-202.
- Halloun, I. A. (1996). Schematic Modeling for meaningful learning of physics. *Journal of Research in Science Teaching*, 33(9), 1019-1041.
- Halloun, I. A. (2007). Mediated modeling in science education. *Science and Education*, 16(7-8), 653-697.
- Harrison, A. G., & Treagust, D. F. (1996). Secondary students' mental models of atoms and molecules: Implications for learning chemistry. *Science Education*, 80(5), 509-534.
- Harrison, A. G., & Treagust, D. F. (2000). A typology of school science models. *International Journal of Science Education*, 22(9), 1011-1026.
- Henze, I., van Driel, J., & Verloop, N. (2007). The change of science teachers' personal knowledge about teaching models and modelling in the context of science education reform. *International Journal of Science Education*, 29(15), 1819-1846.
- Hestenes, D. (1993). Modeling is the name of the game. A presentation at the NSF Modeling Conference (Feb. 1993).
- Hestenes, D. (1987). Toward a modelling theory of physics instruction. *American Journal of Physics*, 55(5), 440-454.
- Hodson, D. (1993). Re-thinking old ways: Towards a more critical approach to practical work in school science. *Studies in Science Education*, 22(1), 85-142.
- Hodson, D. (2014). Learning science, learning about science, doing Science: different goals demand different learning methods. *International Journal of Science Education*, 36(15), 2534-2553.
- Hogan, K., & Thomas, D. (2001). Cognitive comparisons of students' systems modelling in ecology. *Journal of Science Education and Technology*, 10(4), 319-345.
- Jang, E. K., Ko, W., & Kang, S. J. (2012). The analysis of university student's modeling patterns and perceptions through modeling experiments. *Journal of the Korean Association for Research in Science Education*, 32(1), 1-14.
- Jeong, H. S., & Kim, Y. M. (2014). An investigation of pre-service secondary science teachers' perceptions on scientific models. *Teacher Education Research*, 53(4), 682-692.
- Johnson-Laird, P. N. (1980). *Mental Models in Cognitive Science*. *Cognitive Science*, 4(1), 71-115.
- Jonassen, D., Strobel, J., & Gottdenker, J. (2005). Model building for conceptual change. *Interactive Learning Environments*, 13(1-2), 15-37.
- Justi, R., & Gilbert, J. K. (2002). Modeling, teachers' views on the nature of modeling, and implications for the education of modelers. *International Journal of Science Education*, 24(4), 369-387.
- Justi, R., & Gilbert, J. K. (2003). Teachers' views on the nature of models. *International Journal of Science Education*, 25(11), 1369-386.
- Kim, H. B., Kim, S. H., Lee, S. K., & Kim, H. L. (2001). The effect of a factory analogy on student motivation and understanding of the function of cell parts. *Biology education*, 29(4), 346-353.
- Kim, M. Y., & Kim, H. B., (2007). Analysis of high school students' conceptual change in model-based instruction for blood circulation. *Journal of the Korean Association for Research in Science Education*, 27(5), 379-393.
- Kim, S. J., Maeng, S. H., Cha, H. J., Kim, C. J., & Choe, S. U. (2013). The contents of practical knowledge realized in two science teachers' classes on social construction of scientific models. *Journal of the Korean Association for Research in Science Education*, 33(4), 807-825.
- Kim, H. Y. (2013). An investigation of the effect of model-centered instruction using language diagnosis tool. *The Journal of Educational Information and Media*, 19(2), 175-200.
- Kim, A. J., Park, H. J., Kim, C. J., Kim, H. B., Yoo, J. H., & Choe, S. U. (2012). Analysis of scientific models in science textbooks for the 7th grade. *Journal of the Korean Chemical Society*, 56(3), 363-370.
- Koponen, I. (2007). Models and modelling in physics education: a critical re-analysis of philosophical underpinnings and suggestions for revisions. *Science and Education*, 16(7-8), 751-773.
- Kozma, R. B. & Russell, J. (1997). Multimedia and understanding: expert and novice responses to different representations of chemical phenomena. *Journal of Research in Science Teaching*, 34(9), 949-968.
- Krell, M., Upmeyer zu Belzen, A., & Krüger, D. (2012). Students' understanding of the purpose of models in different biological contexts. *International Journal of Biology Education*, 2(2), 1-34.
- Krell, M., Reinisch, B., & Krüger, D. (2014). Analyzing students' understanding of models and modeling referring to the disciplines biology, chemistry, and physics. *Research in Science Education*, 45(3), 367-393.
- Lederman, N. G. (2007). Nature of science: Past, present and future. In S. K. Abell & N. G. Lederman (Eds.), *Handbook of research on science education* (pp. 831-879). Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates.
- Lee, J. M., Kang, E. J., Kim, M. S., Kam, G. T., Kim, J. O., Park, T. J., Kim, S. I., Shin, H. J., Lee, K. O., Kim, Y. J., Lee, J. H., Do, G. S., Lee, Y. E., Park, J. Y., Park, C. H., & Lee, J. S. (2015). *Cognitive psychology*. 5rd Ed. Hakgisa, Seoul.
- Lee, M. J. (1999). Children's mental models of the free-fall of objects. *Journal of the Korean Association for Research in Science Education*, 19(3), 389-399.
- Lim, H. J. (2005). High school students' understanding of the atomic model and orbitals. *Journal of the Korean Association for Research in Science Education*, 25(2), 297-306.
- Luisi, P.L. & Thomas, R. M. (1990). The pictographic molecular paradigm: Pictorial communication in the chemical and biological sciences. *Naturwissenschaften*, 77(2), 67-74.
- Mandinach, E., & Cline, H. (1993). Systems, science and schools. *System Dynamics Review*, 9(2), 195-206.
- Mendonca, P. C. C., & Justi, R. (2013). An instrument for analyzing arguments produced in modeling-based chemistry lessons. *Journal of research in science teaching*. 51(2), p192-218.
- Ministry of Education (MOE). (2015). 2015 revised curriculum-Science. Seoul: Ministry of Education.
- Morrison, M., & Morgan, M. S. (1999). Models as mediating instruments. In M. Morrison & M. S. Morgan (Eds.), *Models as mediators* (pp. 10-37). Cambridge: Cambridge University Press.
- National Research Council (1996). *National education standards*. Washington, D.C.: National Academy Press.
- National Research Council. (2012). *A framework for K-12 science education: practices, cross-cutting concepts, and core ideas*. committee on a conceptual Framework for new K-12 science education standards. Washington DC: National Academy Press.
- NGSS Lead States. (2013). *Next generation science standards: For states, by states*. Washington, DC: National Academies Press.
- Nisbett, R. E., & Wilson, T. D. (1977). Telling more than we can know: verbal reports on mental processes. *Psychological Review*, 84(3), 231-

- Odenbaugh, J. (2005). Idealized, inaccurate but successful: a pragmatic approach to evaluating models in theoretical ecology. *Biology and Philosophy*, 20, 231-255.
- Oh, P. S. (2007). With a focus on lessons in the domains of atmospheric and oceanic earth sciences-analysis of the manners of using scientific models in secondary earth science classrooms. *Journal of the Korean Association for Research in Science Education*, 27(7), 645-662.
- Oh, P. S. (2009). Preservice elementary teachers' perceptions on models used in science and science education. *Journal of Korean Elementary Science Education*, 28(4), 450-466.
- Oh, P. S., & Oh, S. (2011). What teachers of science need to know about models: an overview. *International Journal of Science Education*, 33(8), 1109-1130.
- Osborne, J. F. & Patterson, A. (2011). Scientific argument and explanation: a necessary distinction?. *Science Education*, 95(4), 627-638.
- Ornek, F. (2008). Models in science education: applications of models in learning and teaching Science. *International Journal of Environmental & Science Education*, 3(2), 35-45.
- Passmore, C., Stewart, J., & Cartier, J. (2009). Model-based inquiry and school science: creating connections. *School Science and Mathematics*, 109(7), 394-402.
- Passmore, C., & Svoboda, J. (2012). Exploring opportunities for argumentation in modelling classrooms. *International Journal of Science Education*, 34(10), 1535-554.
- Penner, D. E. (2001). Cognition, computers, and synthetic science: building knowledge and meaning through modeling. *Review of Research in Education*, 25(2000-2001), 1-35.
- Piburn, M. D., Reynolds, S. J., Leedy, D. E., McAuliffe, C. M., Birk, J. P. & Johnson, J. K. (2002). The hidden earth: visualization of geologic features and their subsurface geometry. Paper presented at the annual meeting of National Association for Research in Science Teaching, New Orleans.
- Portides, D. P. (2007). The relation between idealization and approximation in scientific model construction. *Science and Education*, 16(7), 699-724.
- Raghavan, K., & Glaser, R. (1995). Model-based analysis and reasoning in science: The MARS Curriculum. *Science Education*, 79(1), 37-61.
- Redish, E. F. (1994). The implications of cognitive studies for teaching physics. *American Journal of Physics*, 62(9), 792-803.
- Richards, J., Barowy, W., & Levin, D. (1992). Computer simulation in the science classroom. *Journal of Science Education and Technology*, 1(1), 67-79.
- Romberg, T., Carpenter, T., & Kwako, J. (2005). Standards based reform and teaching for understanding. In T. Romberg, T. Carpenter, & F. Dremock (Eds.), *Understanding mathematics and science matters* (pp. 3-26). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Rosenblueth, A., & Wiener, N. (1945). The role of models in science. *Philosophy of Science*, 12(4), 316-321.
- Rouse, W. B. & Morris, N. M. (1986). On looking into the black box: Prospects and limits in the search for mental models. *Psychological Bulletin*, 100(3), 349-363.
- Schecker, H. P. (1993). Learning physics by making models. *Physics Education*, 28(2), 102-106.
- Schwarz, C. V. (2002). Is there a connection? The role of meta-modeling knowledge in learning with models. In P. Bell, R. Stevens, & T. Satwicz (Eds.), *Keeping learning complex: The Proceedings of the Fifth International Conference of the Learning Sciences (ICLS)*. Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Schwarz, C. V. (2009). Developing preservice elementary teachers' knowledge and practices through modeling-centered scientific inquiry. *Science Education*, 93(4), 720-744.
- Schwarz, C. V., & Gwekwerere, Y. N. (2007). Using a guided inquiry and modeling instructional framework (EIMA) to support preservice K-8 science teaching. *Science Education*, 91(1), 158-186.
- Schwarz, C. V., Reiser, B. J., Davis, E. A., Kenyon, L., Acher, A Fortus, D., Shwartz, Y., Hug, B., & Krajcik, J. (2009). Developing a learning progression for scientific modeling: making scientific modeling accessible and meaningful for learners. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 632-654.
- Schwarz, C. V., & White B. Y. (2005). Metamodeling knowledge: developing students' understanding of scientific modeling. *Cognition and Instruction*, 23(2), 165-205.
- Shim, Y. S., Kim, C. J., Choe, S. U., Kim, H. B., Yoo, J. H., Park, H. J., Kim, H. Y., Park, K. M., Jang, S. H. (2015). Exploring small group features of the social-construction process of scientific model in a combustion class. *Journal of the Korean Association for Research in Science Education*, 35(2), 217-229.
- Sins, P. H. M., Savelsbergh, E. R., & van Joolingen, W. R. (2005). The difficult process of scientific modelling: An analysis of novices' reasoning during computer-based modelling. *International Journal of Science Education*, 27(14), 1695-1721.
- Sins, P., Savelsbergh, E., Van Joolingen, W., & van Hout-Wolters, B. (2009). The relation between students'epistemological understanding of computer models and their cognitive processing on a modelling task. *International Journal of Science Education*, 31(9), 1205-1229.
- Snow, R. E. (1990). New approaches to cognitive and conative assessment in education. *International Journal of Educational Research*, 14(5), 455-473.
- Stewart, J., Hafner, R., Johnson, S., & Finkel, E. (1992). Science as model building: Computers and high-school genetics. *Educational Psychologist*, 27(3), 317-336.
- Stratford, S. J., Krajcik, J., & Soloway, E. (1998). Secondary students' dynamic modelling processes: Analysing, reasoning about, synthesizing, and testing models of stream ecosystems. *Journal of Science Education and Technology*, 7(3), 215-234.
- Talanquer, V. (2011). Macro, submicro, and symbolic: the many faces of the chemistry "triplet". *International Journal of Science Education*, 33(2), 179-195.
- Treagust, D. F., Chittleborough, G. D., & Mamiala, T. L. (2002). Students' understanding of the role of scientific models in learning science. *International Journal of Science Education*, 24(4), 357-368.
- Treagust, D. F., Chittleborough, G. D., & Mamiala, T. L. (2004). Students' understanding of the descriptive and predictive nature of teaching models in organic chemistry. *Research in Science Education*, 34(1), 1-20.
- Valanides, C. & Angeli, N. (2008). Learning and teaching about scientific models with a computer-modeling tool. *Computers in Human Behavior*, 24(2), 220-233.
- van Driel, J. H., & Verloop, N. (1999). Teachers' knowledge of models and modeling in science. *International Journal of Science Education*, 21(11), 1141-1153.
- van Driel, J. H., & Verloop, N. (2002). Experienced teachers' knowledge of teaching and learning of models and modeling in science education. *International Journal of Science Education*, 24(12), 1255-1272.
- Vosniadou, S. (1994). Capturing and modeling the process of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4(1), 45-69.
- White, B. Y. (1993). Thinker Tools: causal models, conceptual change, and science education. *Cognition and Instruction*, 10(1), 1-100.
- White, B. Y., & Frederiksen, J. (1998). Inquiry, modeling, and metacognition: Making science accessible to all students. *Cognition and Instruction*, 16(1), 3-118.
- Windschitl M., Thompson J., & Braaten M., (2008). Beyond the scientific method: Model-Based Inquiry as a new paradigm of preference for school science investigations. *Science Education*, 92(5), 941-967.
- Windschitl, M., & Thompson, J. (2013). The modeling toolkit. *Science Teacher*, 80(6), 63-69.
- Yoon, H. G. (2011). Pre-service elementary teachers' inquiry on a model of magnetism and changes in their views of scientific models. *Journal of Korean Elementary Science Education*, 30(3), 353-366.
- Zhang, B., Wong, L. H., Chew, L. C., Jacobson, M. J., & Looi, C. (2006). Using computer-based modelling for primary science learning and assessment, Paper presented at the 32nd Annual Conference of the International Association of Educational Assessment (IAEA) on "Assessment in an Era of Rapid Change: Innovations and Best Practices", Singapore, 21-26 May 2006.