



## 과학적 글쓰기를 활용한 논의-기반 모델링 전략의 개발

조혜숙, 남정희\*, 이동원  
부산대학교

### The Development of Argument-based Modeling Strategy Using Scientific Writing

Hey Sook Cho, Jeonghee Nam\*, Dongwon Lee  
Pusan National University

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received 24 July 2014

Received in revised form

21 August 2014

Accepted 25 August 2014

##### Keywords:

model,  
modeling,  
Argument-based Modeling (AbM),  
multimodal representation,  
writing,  
argumentation

#### ABSTRACT

The purpose of this study is to develop an argument-based modeling strategy, utilizing writing and argumentation for communication in science education. We need to support students and teachers who have difficulty in modeling in science education, this strategy focuses on development of four kinds of factors as follows: First, awareness of problems, recognizing in association with problems by observing several problematic situations. Second is science concept structuralization suggesting enough science concepts by organization for scientific explanation. The third is claim-evidence appropriateness that suggests appropriate representation as evidence for assertions. Last, the use of various representations and multimodal representations that converts and integrates these representations in evidence suggestion. For the development of these four factors, this study organized three stages. 'Recognition process' for understanding of multimodal representations, and 'Interpretation process' for understanding of activity according to multimodal representations, 'Application process' for understanding of modeling through argumentation. This application process has been done with eight stages of 'Asking questions or problems - Planning experiment - Investigation through observation on experiment - Analyzing and interpreting data - Constructing pre-model - Presenting model - Expressing model using multimodal representations - Evaluating model - Revising model'. After this application process, students could have opportunity to form scientific knowledge by making their own model as scientific explanation system for the phenomenon of the natural world they observed during a series of courses of modeling.

## 1. 서론

모델의 목적은 관찰한 자연 현상을 설명하기 위해 의미를 형성하고 과학적 아이디어를 다른 사람과 의사소통하기 위한 것이다(Schwarz *et al.*, 2009). 이렇듯 자연 세계에서 관찰한 것에 대해 단순화한 표상인 모델을 만드는 것에서 더 나아가 모델을 사용하고 평가하고 수정하는 일련의 과정을 모델링이라고 한다.

모델링은 자연 현상을 기초로 하여 개인이 관찰한 것을 설명하고 예측하기 위해 만들어진 추론 과정(Greca & Moreira, 2002)인 내적 표상을 다중표상을 사용하여 구체화시킨 외적 표상으로 표현한 것이다. 모델링은 과학교육에서 정교화 된 과학 지식이 어떻게 작용하는지와 어떻게 설명되는지에 대해 보여줌(Oh & Oh, 2011)으로써 과학적 지식의 본성에 대한 이해와 함께 과학적 지식의 생성과 평가를 가능하게 한다(Lehrer & Schauble, 2006). 또한 학습자는 모델링 과정을 통해 경험적 증거를 검토하고 모델의 기본적인 가정을 수정하는 반복적인 과정을 거쳐 학습하게 되므로(Suckling *et al.*, 1978), 모델링은 과학 지식을 구성하고 발전하고 적용하는 주요한 인지과정이자 체계적인 활동이다(Halloun, 1996; Hestenes, 1987).

과학적 현상에 대한 모델링 과정은 과학적 소양의 중요한 요소이자

Clement, 2000; Coll, 2005; Gobert & Buckley, 2000) 과학의 본성을 이해하는 방법으로서(Lederman, 2007), 과학에서 지식 생성을 이해하기 위해 기본적인 것이다(Carey & Smith, 1993; Lederman, 2007; Lehrer & Schauble, 2006). 또한 미국은 K12의 전 학년에 대한 차세대 인재육성을 위한 과학교육 표준인 NGSS(Next Generation Science Standards)에서 학생 스스로 지식을 습득할 수 있는 실천을 강조하면서, 학생들에게 과학적 지식의 개발에 중요한 역할을 하는 모델과 친숙해질 기회 제공의 중요성을 강조했다(National Research Council, 2012).

과학교육은 학생들이 과학적인 습관을 키우고, 과학적 탐구에 대한 능력을 개발하고, 과학적 맥락에서 추론하는 방법을 가르치는 것이다(DeBoer, 1991; Layton, 1973). 이러한 과학적 탐구 능력은 학습자 스스로 과학 지식을 재구성하여 능동적으로 만들거나 새로운 지식을 생성할 수 있는 능력을 의미하며 이는 과학교육의 중요한 목표(Kwon *et al.*, 2003; National Research Council, 2000)이다. 이러한 과학교육은 학습자가 의사소통을 통해 정보를 능동적으로 사용하고 구성하는 능력을 바탕으로(Davenport & Prusak, 1997), 자신의 인지 구조 속에서 과학적 지식의 해석 및 재구성하는 것을 강조한다(Kang, 1997; Lee, 2007). 이러한 과학적 탐구와 의사소통을 실습하기 위한 과학적 과정이 모델링이다(Giere *et al.*, 2006; Magnani & Nersessian, 2002;

\* 교신저자 : 남정희 (jhnam@pusan.ac.kr)

\*\* 이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음

\*\*\* 본 논문은 조혜숙의 2014년도 박사 학위논문에서 발췌 정리하였음

<http://dx.doi.org/10.14697/jkase.2014.34.5.0479>

Morgan & Morrison, 1999).

의사소통을 통한 모델링은 논의와 글쓰기라는 두 가지 형태의 과학적 언어를 이용한 과정이다. 논의는 자신이 세운 주장을 정당화하기 위해서 타당한 추론과 함께 말하기와 듣기를 통해 자신의 아이디어를 표현하고 다양한 증거를 가지고 의사소통하는 과정이다(Bybee, 2011; Haack, 2003). 학생들은 논의과정을 통해 자신의 주장을 정당화거나 자신의 아이디어를 정교화하면서 지식을 재구성하고 공유하게 된다(Giere *et al.*, 2006; Laubichler & Müller, 2007; Magnani & Nersessian, 2002; Morgan & Morrison, 1999; National Research Council, 2012). 학생들은 글쓰기 과정을 통해 과학적 증거를 바탕으로 지식을 구성하고 개념을 획득(Kelly *et al.*, 2002)할 수 있게 된다. 이러한 글쓰기 과정은 과학적 사실, 개념, 원리, 법칙, 이론, 가설에 대해 사고하는 내용과 과정을 글로 표현하는 활동으로(Owens, 2000), 비판력, 분석력, 종합력 향상에 긍정적인 역할을 한다(Lee, 2002).

논의와 글쓰기 같은 과학적 언어를 통한 의사소통에서 증거 제시 방법은 언어의 질에 대한 중요한 평가의 요소가 된다(Nam *et al.*, 2008). 왜냐하면 의사소통의 효과성은 경험적으로 학습자의 주장을 평가하고 증거를 찾는 능력에 의존하기 때문이다(Sarah & Lance, 2000). 여기서 증거는 어떠한 학문분야를 막론하고 합리적인 추론을 하는데 필수적인 요소이며(Seigel, 1988), 주어진 증거와 이론적 설명을 연결하고 이들 간의 관계를 조정하는 것이 과학적 탐구의 중요한 과정이다(Kuhn, 1989). 모델링의 목적인 의사소통을 위해서 학습자는 현상의 관찰이나 조사 및 검증을 통해 현상의 중요한 속성과 특성을 증거로 하여 현상과 모델이 어떻게 관련이 되어있는지 상세하게 설명하게 된다(Romberg *et al.*, 2005).

과학 학습에서 모델을 사용해야 되는 기본 이유는 현상을 표상하거나 설명하고, 자료를 수집하고, 현상을 예측하기 위해서이다(National Research Council, 2012). 모델은 자연 현상이나 계에서 어떤 특성에 초점을 맞춘 단순화한 표상이다. 따라서 모델을 이해하기 위해서는 다중표상에 대한 이해가 필수적이며, 다중표상은 의사소통을 위한 설명의 증거 제시에서 또한 중요하다. 학생들은 논의과정에서 자신들의 주장과 논리적인 연결을 가진 증거를 제시할 때 다중표상을 가장 활발하게 사용한다(Hand *et al.*, 2008; Kelly & Takao, 2001). 또한 글쓰기에서 다중표상은 과학적 소양을 발달시키는데 중요한 요인이 되며(Lemke, 1998), 다중표상을 사용한 쓰기를 통해 학생들은 시각적 정보를 구체화하게 되고, 그 의미를 명확하게 파악하게 된다(Hand *et al.*, 2004). 이러한 다중표상의 사용에서 단순히 여러 가지 표상을 사용하는 것이 중요한 것이 아니라, 과학적 설명에서 표상 간의 전환을 통해 학습과 다중표상 사이를 직접적으로 연결하는 것이 중요하다(Pineda & Garza, 2000).

과학교육에서 모델링이 갖는 중요성과 함께 모델 및 모델링에 대한 연구가 진행되고 있음에도 불구하고, 학생들은 과학적 모델을 효과적이고 적절하게 사용할 기회가 부족하였기 때문에 모델의 역할을 제대로 이해하지 못하고 있다(Treagust *et al.*, 2002). 과학교사의 경우에도 과학의 학습에서 인식론적 목표를 제공하는 모델링 가치 및 역할에 대한 교사의 이해가 부족하다(Justi & Gilbert, 2002a; Schwarz, 2009; van Driel & Verloop, 2002; Windschitl *et al.*, 2008b). 또한 수업에 모델링 활동을 포함시키지 않거나(Justi & Gilbert, 2002a, 2002b; van Driel & Verloop, 1999), 수업에 적용하더라도 모델링 실습에서 이루어

어지는 학생들의 지식에 무지하거나(Harrison & Treagust, 2000; Justi & Gilbert, 2002a), 수업을 지원하는 교육과정 자료가 없는 현실이다(Henze *et al.*, 2007; Justi & Gilbert, 2002a). 따라서 교사들에게 과학에서 사용되는 모델링의 중요성에 대한 인식할 수 있는 기회와 과학 수업에서 활용될 수 있는 모델링 전략이 제공되어야 한다.

논의에 기반한 모델링에서 학습자는 자연 세계에서 관찰한 현상을 모델로 만드는 과정을 통해, 자신이 이해한 것을 내면화하여 표현할 뿐만 아니라 다른 사람의 의견을 듣고 과학적 지식을 교환하면서, 자신이 만든 모델을 평가하고 수정하게 한다. 또한 모델인 과학적 설명에 대해 과학적이고 논리적인 증거를 제시하는데 있어서, 그 증거는 적절해야 하고 통합된 다중표상을 사용하여야 한다. 이러한 논의-기반 모델링 전략은 논의와 글쓰기라는 과학적 언어의 사용을 통해서 증거의 중요성, 주장과 증거의 적절성, 다양한 표상으로 제시된 증거에 초점을 맞춘 것이라 할 수 있다. 이를 통해 학생들은 스스로 지식을 구성할 수 있는 능력을 키우게 되고, 일상생활에서 겪을 수 있는 문제에 대해 능동적으로 해답을 찾을 수 있게 된다.

따라서 이 연구에서는 과학교육의 목적인 의사소통을 위해 과학교실 수업에서 사용할 수 있는 논의와 글쓰기라는 과학적 언어의 사용과 증거 제시에서 다중표상의 이해 및 활용을 강조하는 논의-기반 모델링 전략을 개발하였다.

## II. 이론적 배경

### 1. 모델에 대한 이해

모델은 계(system)의 중요한 특성을 명백하게 만들기 위해 단순화하고 추상화한 표상이며(Gobert & Buckley, 2000), 특별한 목적으로 실제 세계의 어떤 부분을 상황과 관련지어 비유에 바탕을 두어 만든 표상이다(Chamizo, 2013). 모델은 물체, 실제, 어떤 물체나 현상, 아이디어 등의 여러 가지 속성 중에서 관심 있는 특징을 표상하거나 관계를 보여주는 사물, 기호, 그림 또는 그것들의 체계이다(Chamizo, 2013; Ha *et al.*, 2009). 또한 모델은 과학적 현상을 이해하거나 설명하기 위하여 시각적 혹은 외현적으로 표상화한 개념적 모델로 정의하기도 한다(National Research Council, 2012). 특히, 과학적 모델은 눈에 보이지 않는 요소와 추상적인 개념을 구체화한 것이고(Chi *et al.*, 1991; White, 1993), 물리적 체계의 일련의 구조와 행동에서 나타나는 특정한 패턴을 과학 이론의 문맥과 일치시킨 개념체계이다(Halloun, 2006). 과학적 모델은 자연 현상이나 실제 생활의 현상에 대한 설명이다(Halloun & Hestenes, 1985; Kim & Kim, 2007). 이처럼 모델은 구체적인 대상이나 과정을 언어적 또는 시각적 실제들로 표현하는 것으로, 시각화한 개념적 모델인 그림, 도표, 구체적인 복제품, 컴퓨터 시뮬레이션, 컴퓨터 프로그래밍 같은 수학적 알고리즘, 문제해결 과정, 비유적 교수 모델(Buckley & Boulter, 2000; Harrison & Treagust, 1996) 등이 포함된다.

모델의 기능을 살펴보면, 모델은 요약된 실체를 보이게 만들어 주고(Francoeur, 1997), 복잡한 현상을 단순화하거나 묘사(Rouse & Morris, 1986)함으로써 경험한 실제 세계(실체)와 과학적 이론을 연결해준다(Gilbert, 2004). 또한 모델은 과학 수업에서 추상적이고 어려운 과학 개념 및 복잡한 관계를 명백한 시각적 표상으로 보여주는 인공물로

구체적으로 나타나기 때문에(Bliss, 1994; Hogan & Thomas, 2001; Mandinach, 1988; Schecker, 1993, 1994), 직접 관찰할 수 없는 개념과 이론에 대한 이해를 도울 수 있다(Cha *et al.*, 2004). 따라서 모델은 실제 세계에서 일어나는 현상에 대한 과학적인 설명 및 예측을 위한 기초를 제공해줌으로써(Gilbert *et al.*, 1998), 과학적 지식의 생산, 보급, 수용에 필수적이라고 볼 수 있다(Giere, 1988; Gilbert, 1991; Tomasi, 1988). 이와 같은 특성을 지닌 모델의 본성에 대한 이해는 과학의 본성(Nature of Science)에 대한 이해와 통합되는 부분으로 모델은 개념적으로 설명될 수 있으며(Gobert *et al.*, 2011), 과학교육과 과학적 소양 교육에서 중요한 교수 학습 도구이자 수단이고(Gilbert, 1991; Halloun, 2007), 과학 내용 지식을 학습할 때 효과적인 도구가 된다(Chabalengula & Mumba, 2012).

모델의 분류를 살펴보면, 모델은 정신 모델과 물질 모델로 구분할 수 있다(Chamizo, 2013; Gobert & Buckley, 2000).

정신 모델(mental model)은 사람들이 실제로 머릿속에 가지고 있는 것(Norman, 1983)으로, 학습자가 자연 현상을 기초로 현상을 설명하고 예측하기 위해 만든 표상이다(Clement, 2008; Clement & Rea-Ramírez, 2008; Coll & Treagust, 2003; Vosnadiu, 1994). 정신 모델은 어떤 현상에 대한 인과적 이해를 위한 수단으로 특별한 자연 현상에 기초하여 예측할 수 있는 패턴, 법칙, 설명적 구조를 나타내기 위해 외부 세계와의 상호작용을 통해 형성된 내적 표상(internal representation)이다(Gobert & Buckley, 2000; Greca & Moreira, 2002; Johnson-Laird, 1983). 이는 수업을 통하여 획득된 형식이론과 공존하며, 사람들의 경험을 통하여 형성된 비과학적인 이해양식으로 학생들의 사고에 단단하게 자리 잡아 있기 때문에 바꾸기가 매우 어렵고, 새로운 학습을 방해한다(Anderson & Smith, 1987; Lee, 1999). 정신 모델은 학생들 개개인이 가지고 있는 내적개인적특이적불안정한 모델이다(Greca & Moreira, 2000). 이러한 정신 모델의 역할은 물리적 세계를 설명하고 예측할 때 개인의 추론 과정을 설명하는 것이다(Greca & Moreira, 2002).

물질 모델(material model)은 과학적으로 인정되는 지식을 바탕으로 현상을 정확하고 단순하게 완성한 표상이다(Greca & Moreira, 2000). 물질 모델은 다른 사람과 의사소통하기 위해 만들어진 것이다(Gilbert *et al.*, 2000). 이는 과학적 이론인 정신 모델을 구체화시켜 표현한 외적 표상(external representation)으로 표현된 모델(expressed model), 개념 모델(conceptual model)로 명명되기도 한다(National Research Council, 2011). 이 연구에서 물질 모델은 세계가 정신과 물질로 구분되는 이분법적 표현방식에 의해 정신의 반대적인 개념을 강조한 것이지만, 정신 모델을 외적 표상으로 표현한 것이기에 표현된 모델로 명칭을 통일하고자 한다. 이러한 표현된 모델은 일어난 사건이나 시간의 흐름에 따라 무엇이 일어났는지 현상을 설명하고 예측하기 위한 것으로, 과학적 이론을 표현하거나 구체화한 것이다(Schwarz *et al.*, 2009). 이러한 관점에 따라 정신 모델, 표현된 모델과 실제 세계와의 관계는 Chamizo (2013)과 Boulter & Buckley (2000)의 모형을 수정하여 Figure 1에 나타냈다. 실제 세계에 대한 관찰과 이를 바탕으로 한 추론을 통해 구성된 지식, 개념, 이론을 내적 표상으로 나타낸 것이 정신 모델이고, 이 정신 모델을 여러 가지 표현방식인 다중표상을 사용하여 나타낸 외적 표상이 표현된 모델이다. 이 표현된 모델은 실제 세계를 설명하고 예측하기 위해 사용된다. 예를 들어 학습자가 어떠한

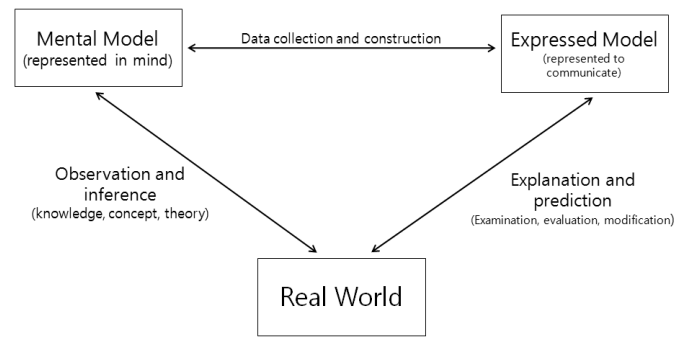


Figure 1. Relationship between a model and the real world

과학 현상이나 물체에 대해 듣거나 봤을 때, 이에 대해 머릿속으로 그리는 정신 이미지나 언어 등의 내적 표상이 정신 모델이다. 이러한 정신 모델을 원형으로 삼아 학습자가 글, 그림, 그래프, 도표, 예 등 다양한 표상을 사용하여 외적으로 표현한 것이 표현된 모델이 된다. 정신 모델은 학습자의 생각에 의해서 나타나는 것이므로, 학습으로 인해 정신 모델이 변화할 수 있지만 이를 확인할 수 없다. 학습자는 단순히 내적 이미지 형성에 머무는 것이 아니라 이를 외적으로 표현함으로써 자신의 사고와 학습을 구체화할 수 있으며, 다른 사람과 상호작용할 수 있고, 다른 사람의 비판을 반영하여 오개념을 정정할 수 있다. 또한 이를 통해 교사는 학습의 목표에 따라 학생들의 학습 결과를 확인할 수 있다.

## 2. 모델링에 대한 이해

모델링에 대한 이해는 학생들의 표현에 대한 원형이 되는 정신 모델에 대한 이해로부터 출발한다. 모델링은 학생들이 가진 인지적 요소들의 조합인 정신 모델을 과학적으로 받아들여지는 과학적 지식에 부합되는 간결하고 완전한 표상인 표현적 모델로 변화시키는 과정이다(Redish, 1994). 즉, 학생들은 과학 개념에 대한 정신 모델을 틀로 삼아서 말하기, 쓰기, 실체가 있는 것으로 나타낸 표현된 모델로 바꾸고, 그 표현된 모델을 문제 해결 과정에 적용하여 조사해본 후 지속적으로 수정해 감으로써 목표인 개념에 대한 이해를 정교화 할 수 있다(Buckley & Boulter, 2000; Gilbert & Ireton, 2003; Schwarz & Gwekwerere, 2007).

모델링은 경험적 증거로, 모델을 재검토하고 모델의 기본적인 가정을 수정하는 반복적인 과정을 거쳐 모델을 발달시키는 것이다(Suckling *et al.* 1978). 또한 모델링은 학생들에게 자신이 이해한 것을 반성하고 자신의 정신 모델을 시험할 수 있는 기회를 제공한다(Gilbert *et al.*, 1998; Jonassen *et al.*, 2005; Schecker, 1993).

따라서 과학교육의 목적은 학생들이 가지고 있는 정신 모델을 표현된 모델로 전환하는 것이라고 할 수 있다(Ogan-Bekiroglu, 2007). 과학적 현상에 대한 모델링 능력은 과학적 소양의 중요한 요소이고(Clement, 2000; Coll, 2005; Gobert & Buckley, 2000), 성공적인 학습을 이끌게 된다(Gilbert & Ireton, 2003; Gobert, 2005). 모델을 개발하고 조사하는 모델링 과정에 학습자들을 개입시키는 것은 과학에서 핵심 모델에 대한 더욱 정교한 이해, 학문적 지식의 본성에 대한 이해와 함께 과학적 지식을 구성하고 평가하는 과정에 대한 전문지식을 수립하는데 도움을 줄 수 있다(Lehrer & Schauble, 2006; Lesh & Doerr,

2000; Schwarz & White, 2005; Stewart *et al.*, 2005).

이러한 모델링의 목표에는 현상에 대한 학습자의 이해인 의미형성과 이를 다른 사람에게 설명하는 의사소통의 두 가지가 있다(Schwarz *et al.*, 2009). 의미형성(sense making)은 학습자들이 하여금 새로운 이해를 자신을 위해 만들어내는 것으로 현상과 사고를 명확히 하는 것을 돕기 위해 모델로 표현하여 자신의 이해를 나타내는 것이다. 의사소통(communication)은 자신이 창조한 모델을 다른 사람과 공유할 준비가 되어있는 지점에서 그들의 모델을 분명히 설명하고, 자신의 생각을 다른 사람들에게 설득하거나 다른 사람이 현상을 이해하도록 돕거나 집단의 합의를 발달시키기 위한 것이다. 이들 두 목표는 모델링 실습의 요소와 모델링 지식에서 서로 관련되어 있으며 상호 지원적이고, 때때로 동시에 일어난다.

### 3. 모델링에 대한 교육학적 접근

과학교육에서 모델링을 실제로 활용하기 위한 모델링 실습을 위해서 교육학적 접근이 필요하다. 모델링 실습의 교육학적 접근은 학생들에게 모델링 실습에 대한 동기를 부여하고, 논의를 통해 자신이 만든 모델링에 대해 반성하도록 하고, 학생들의 이해와 자연 세계에 대한 설명을 적용하고 평가하기 위한 다양한 기회를 제공하는 것이다. 또한 이와 함께 모델과 관련 있는 실습이나 중요한 메타-지식에 대한 고려를 상기하도록 지원하는 것이다(Fortus *et. al.*, 2006; Schwarz *et al.*, 2009).

모델링 학습은 학생들이 자연 세계에서 일어나는 현상에 대해 반박할 수 있는 설명을 개발하는 것을 목적으로 한다. 이때 반박할 수 있는 설명은 증거로 뒷받침되는 실제 세계의 측면을 이해하는 것을 도와주는 진술문을 의미한다. 설명은 과학적 아이디어에 대해 조사할 수 있고 수정 가능한 표상인 모델을 구체화한 것이다. 모델링 학습은 모델을 설명의 포괄적인 체계로 다루고, 조사를 위해 가설을 만들고, 관찰을 해석하고, 수정하는 것을 포함한다(Windschitl *et al.*, 2008b). 과학에서 모델이나 모델링이 지식의 형성과 정당화에 중요한 역할을 하며 (Tapio, 2007), 실제 세계와 모델링, 모델 사이의 관계를 명백하게 할 수 있다(Chamizo, 2013). 미국의 차세대를 위한 과학 기준에서도 모델링을 통해 인식론적 언어와 교육적인 사고를 얻을 수 있기 때문에 모델링에 대한 교육학적 접근을 강조하고 있다(National Research Council, 2011). National Research Council (2012)에서는 성공적인 과학 학습을 위해 다음의 네 가지 측면(strand)이 잘 구조화되어야 한다고 했다. 첫째, 자연 현상에 대한 과학적 개념 구조를 만들기 위한 과학적 설명을 구성하고 이용하며 해석할 수 있어야 한다. 이는 자연 현상을 이해하기 위해 과학적 설명인 모델을 만들고 토론을 통해 발전시키는 것을 의미한다. 둘째, 과학적 증거와 설명을 만들고 평가하는 것이다. 이는 논의에서 반박과 방어를 하기위해 과학적이고 경험적인 증거를 수집하고 평가하면서 증거에 기반하여 모델을 만들고 정교화하여야 함을 의미한다. 셋째, 과학적 지식은 과학적 공동체 내에서 증거에 의해 정당화되고 비판되는 과정을 거쳐 수정되면서 발전한다는 특성을 이해하여야 한다. 이는 과학적 지식은 합의된 확실성의 수준을 가지고 있는 특별한 종류의 지식이기 때문이다. 넷째, 과학 실천과 토론에 생산적으로 참여하는 것이다. 이는 학생들이 과학적 모델을 만들고, 설명하고, 과학적 토론에 참여하여 다른 사람들의 주장을 비판

하고 설득시키면서 과학 탐구 활동에 효과적으로 참여하는 것을 포함하는 것이다.

과학교육에서 모델링은 학생들이 가진 자연 세계에 대한 초기 신념의 지속성, 수동성, 지식의 분절화라는 전통적 수업의 약점을 고칠 수 있는 장점이 있고(Jackson *et al.*, 2008), 오개념을 간접적으로 해결하는 효과적이고 효율적인 방법이므로(Wells *et al.*, 1995) 새로운 교수-학습 전략으로 주목을 받고 있다. 이러한 교수-학습 전략의 성공을 위해서 학생들은 스스로 전략의 구조를 만들 수 있어야 하고, 교사들은 모델과 모델링에 대한 지식을 가져야 한다.

### 4. 모델링의 단계

과학교육에서 모델링이 갖는 중요한 목적은 다음 세 가지로 나타낼 수 있다(Hodson, 1993). 첫째, 과학의 학습(the learning of science) 측면에서 학생들은 모델링을 통해 과학의 산물인 핵심 모델을 알 수 있다. 둘째, 과학을 하는 방법의 학습(learning how to do science) 측면에서 학생들이 모델링을 통해 자신의 모델을 만들고 실험할 수 있다. 셋째, 과학에 대한 학습(learning about science) 측면에서 학생들은 모델링을 통해 과학적 탐구의 산물을 나타내고, 그 산물을 알리는 모델의 역할을 인식할 수 있다. 이러한 모델링의 목적에 따라 다양한 모델링 수업의 단계가 제시되었다(Table 1). 모델링 단계에 대한 학습이 중요한 이유는 학생들에게 모델 개발 및 사용 과정에서 모델의 단계를 안내하지 않고 모델의 본성이나 목적만을 설명하려고 하는 것은 학생들에게 큰 효과가 없기 때문이다(Schwarz *et al.*, 2009).

National Research Council (2012)에서 개발한 차세대를 위한 과학 기준(NGSS)에서는 모델을 활용한 과학적 실천에서 다음의 8가지 핵심요소를 제시하였다. 첫째, 질문하기이다. 질문하기는 증거, 설명, 설계 해결 방안을 어떻게 교류할 수 있는지에 대해 알기 위해 세상에 대한 호기심, 모델 및 이론의 예측 제기, 모델이나 이론의 확장 및 정교화하기 위한 시도이다. 둘째, 자연환경에서 관찰한 현상에서 관심을 가지고 있는 특징을 부각시키고 다른 특징은 최소화시킨 모델을 개발하고 사용하는 것이다. 이 모델은 계의 행동을 예측하기 위해 사용되며 모델의 응용과 예측 능력과 정확도를 제한하는 가정과 근사값을 사용하고 한계를 정확하게 아는 것이 중요하다. 셋째, 연구의 계획과 수행 과정은 연구 가능한 질문, 이론, 모델을 바탕으로 가설을 만든 후, 어떤 자료를 수집할 것인지, 수집에서 어떤 도구가 필요한지, 측정을 어떻게 기록할 것인지 결정한다. 이를 위해 연구 계획을 수립하고 변인을 설정하는 것이다. 넷째, 자료의 분석과 해석은 수집된 자료의 경향과 관계를 분석하여 그 결과를 다른 사람과 교류할 수 있는 형태인 표, 그래프, 통계적인 분석을 통해 자료를 제시하는 것이다. 다섯째, 수학과 계산적인 사고의 이용은 과학적 모델을 만들기 위해 자연의 경향성을 나타내기 위해 수학을 이용하여 그 관계를 나타낼 수 있어야 한다. 여섯째, 과학적 설명을 구성하는 것이다. 과학적 설명은 과학교육의 가장 중요한 목표로 증거에 바탕을 둔 모델을 만드는 능력을 개발하고, 현상과 과학 이론을 연결하는 것이다. 또한 학생 스스로 과학적 설명을 구성하는 것은 과학 이론에 대한 이해를 향상시키며, 과학이 작동하는 방법에 대한 깊은 통찰력을 증진시키는 중요한 단계이다. 일곱째, 증거를 이용한 토론하는 것이다. 토론은 과학의 핵심이자 과학교육을 지탱하고 있는 요소이며 자신의 설명을 정당화하는 과

Table 1. Steps of modeling lesson

Modeling lesson	Step
A six-stage modelling process (Webb, 1994)	Identify an area of interest-Define the problem- Decide scope, boundaries and purpose of the model- Build(a section of) the model-Test the model- Evaluate the model
GEM cycle (Clement, 2008)	model Generation-Evaluation-Modification
Modeling-centered inquiry approach (Schwarz, 2009)	model Creation-Evaluation-Revision
Steps for skills of model-revision (Stewart <i>et al.</i> , 1992)	Observation of phenomenon in group-Share of experience between groups-Design an explanatory model in group-Defending against the critique of other groups-Revision of model until a degree of convergence in group
ThinkerTools curriculum for model-based inquiry (White & Frederiksen, 1998)	Question-Predict-Experiment-Model-Apply
Inquiry Island to promote students' cognitive, socio-cognitive and metacognitive development (White <i>et al.</i> 2002).	Question-Generating hypothesis-Designing an investigation-Recording and analysing data-Creating models-Evaluation
Abductive Inquiry Model (Oh, 2005)	Exploration-Examination-Selection-Explanation
Modeling learning cycle (Halloun, 2006)	Exploration-Model adduction-Model formulation-Model deployment-Generalization
Inquiry framework EIMA (Schwarz & Gwekwerer, 2007)	Engage-Investigate-Model-Apply
Modeling Instructional framework (Windschitl <i>et al.</i> , 2008a)	Engaging with a question or problem-Developing a tentative model or hypothesis-Making systematic observations-Creating models of phenomena-Evaluating model-Revising model
Modeling instructional cycle (Brewer, 2008)	Introduction and Representation-Coordination of Representations-Introductory application-Application-Abstraction and Generalization-Continued Incremental Development
Instructional modeling sequence (Schwarz <i>et al.</i> , 2009)	Anchoring phenomena-Construct a model-Empirically test the model-Evaluate the model-Test the model against other ideas-Revise the model-Use the model to predict or explain
Model-based inquiry process (Bell <i>et al.</i> , 2010)	Orientation or question-Hypothesis-Plan -Investigation-Model-Conclusion
WiMVT(Web-based inquirer with modeling and visualization technology) inquiry cycle (Sun & Looi, 2013)	Contextualize-Questions and hypothesis-Pre model-Plan-Investigate-Model-Reflect-Apply

정이다. 이때 토론은 다른 사람과 상호작용 하는 가장 효과적인 방법으로 증거에 근거하여 주장과 반박, 방어하는 과정을 통해 학생들은 자신의 지식과 이해의 향상뿐만 아니라 과학적 지식을 사용하는 능력을 키울 수 있다. 여덟째, 정보를 습득하고, 평가하고, 교류하는 것이다. 이를 통해 관련 문헌을 읽고 이해하는 능력과 다양한 표상을 사용하여 나타내고 교류하는 능력을 키우게 된다.

### III. 모델링 전략의 개발

이 연구는 학생들의 과학적 설명을 만드는 과정인 모델링의 향상을 위해 글쓰기를 바탕으로 하는 논의기반 모델링 전략을 개발하는 것을 목적으로 하였다.

#### 1. 논의기반 모델링 전략의 개발

논의기반 모델링은 학생들이 실제 세계에서 관찰한 현상에 대한 과학적 설명을 다른 사람에게 이해시키거나 설득시키는데 초점을 맞춘 모델링이다. 모델링 과정에서 의견을 나누고 다양한 표상을 사용하여 증거를 제시함으로써 설득력 있는 주장을 하고, 다른 사람에게 자신이 만든 설명체계인 모델을 평가받고 수정함으로써 그 과정을 정교하게 된다. 학생들은 과학적 설명을 할 때, 논의과정을 통해 자신의

주장에 대해 증거를 사용하여 지지하거나 반박하게 된다. 이러한 과정에서 학생들은 동료집단 내에서 이루어지는 논의과정을 통해 다른 학생들의 다양한 의견들을 접하고 자신의 의견의 정당성과 타당성을 판단하는 비판적 사고력을 키우게 된다.

따라서 논의기반 모델링은 논의과정이라는 다른 사람과의 상호작용을 통해 사고 능력을 발달시킬 수 있는 과학 탐구의 핵심이라 볼 수 있다. 이를 통해 과학 학습뿐만 아니라 다른 교과의 학습 능력 향상도 가능하게 하는 강력한 실습방법이 될 수 있다(Schwarz, 2009).

논의기반 모델링 전략은 다음 네 가지 요소의 발달에 초점을 맞추었다. 첫째, 여러 문제 상황을 관찰하여 문제를 연관지어 인식하는 ‘문제인식’이다. 둘째, 과학적 설명을 위해 충분한 과학개념을 제시하고 추상적 개념을 포함하여 과학개념을 구조화하여 제시하는 ‘과학개념 구조화’이다. 셋째, 주장에 대해 적절한 증거를 여러 가지 표상으로 제시하는 ‘주장-증거 적절성’이다. 마지막으로 증거 제시에서 다양한 표상의 사용과 과학개념에서 여러 표상을 사용하고 전환하여 통합하는 ‘다중표상 지수’이다.

이러한 네 가지 요소의 발달을 위한 논의기반 모델링 전략 개발을 위해 교수 전략의 측면에서 다음과 같이 접근하였다. 첫째, 실제 세계에서 관찰한 현상에 대한 과학적 설명인 모델링에서 학생들은 주장을 과학적 개념으로 나타내야 한다. 이때 그 주장을 지지하는 증거를 나타내고, 그 증거가 다양한 표상으로 제시되며, 여러 표상이 서로 연결된

다. 하나의 개념은 여러 표상으로 나타날 수 있고, 다른 표상으로 전환될 수 있다. 이러한 요소에 대한 측면에서 학생들의 모델링 능력을 향상시키기 위한 교수 전략을 위해 다중표상에 대한 이해를 위한 ‘인지 과정’과 다중표상 활동을 통한 증거의 중요성을 인식하는 ‘해석 과정’이 필요하다. 둘째, 모델링 교수전략으로 논의를 바탕으로 한 모델링 활동을 적용하였다. 모듈 내에서 실제 세계에서 관찰한 현상에 대한 모델을 만들고, 다른 사람을 이해시키거나 설득시키기 위한 증거를 제시해야 한다. 또한 모듈에서는 논의를 통해 자신들만의 기준을 정해서 다른 모델을 평가하고, 평가한 결과를 통해 모델을 수정하는 일련의 과정을 거쳐 자신들의 모델을 정교화시키는 ‘모델링’을 하게 된다. 학생들은 논의를 기반으로 모델링을 해보는 ‘적용 과정’을 통해 모델링을 직접 접하게 됨으로써 증거 제시의 중요성, 주장과 제시한 증거의 적절성, 다양한 증거 제시의 필요성을 인식하게 된다.

논의-기반 모델링 전략의 ‘인지 과정’, ‘해석 과정’, ‘적용 과정’ 각 stage별 목적과 요소는 다음과 같다.

가. Stage 1: ‘인지 과정’

모델은 다양한 표상으로 나타나기 때문에 이러한 표상에 대한 올바른 이해가 있어야 모델링을 성공적으로 이끌 수 있다. 학생들은 다중표상에 대한 이해를 위한 ‘인지 과정’에서 제시된 정보로부터 다중표상을 구분하고, 다중표상의 역할을 알게 된다. 이러한 ‘인지 과정’은 단일 표상과 다중표상의 구별, 단일 표상과 다중표상의 차이점과 특징에 대한 이해, 다중표상의 역할에 대한 이해의 세 가지 요소로 이루어져 있다. 이 세 가지 요소는 곧 ‘인지 과정’의 단계가 된다.

나. Stage 2: ‘해석 과정’

‘해석 과정’은 다중표상 각각의 특징을 알고 정확하게 사용하는 방법을 습득함으로써 하나의 표상을 다른 표상들로 전환하는 것을 배우는 과정이다. 이러한 다중표상 활동을 통해 학생들은 주장을 할 때 증거의 중요성을 인식하게 되고, 다중표상을 사용하여 증거를 제시할 수 있게 된다. ‘해석 과정’은 다중표상에 대한 이해를 목적으로 하는 과정으로, 다중표상의 정확한 사용법과 목적을 확인하고, 주어진 단일 표상을 다른 표상으로 상호 전환하고, 다중표상을 활용한 증거 사용의 필요성을 인식하는 요소들로 구성되어 있다.

다. Stage 3: ‘적용 과정’

‘적용 과정’은 학생들 스스로 자연 현상을 관찰하고 이를 설명하는 모델링을 설계하는 과정으로 논의과정을 통해 이루어진다. 모델링을 통해 과학적 설명을 다른 사람에게 전하는 기회를 갖게 되고, 논의과정을 통해 다른 사람과 의사소통을 하게 된다. 또한 학생들은 글쓰기에서 자신이 하고자 하는 설명을 뒷받침하기 위해 증거를 제시하고, 글 외에도 그림이나 그래프 등과 같은 다양한 표상으로 표현하는 능력을 키우게 된다. 학생들은 모델링의 목적인 의사소통을 위해 논의와 글쓰기라는 과학적 언어의 사용을 통해 자신의 주장과 증거 사이의 적절성을 알게 되고, 증거 제시의 중요성과 다중표상으로 나타난 증거 제시의

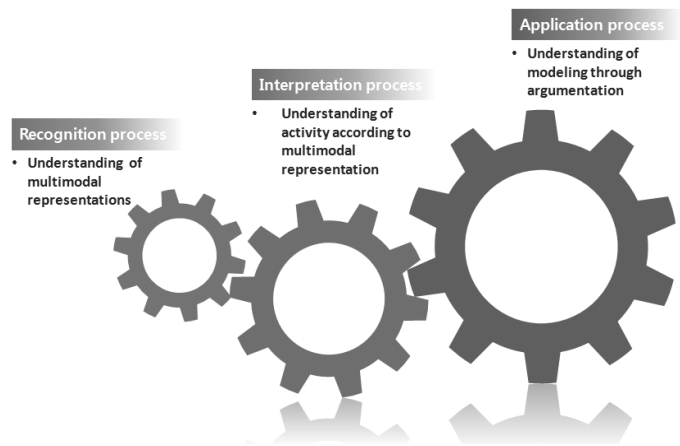


Figure 2. Goal of each stage in argument-based modeling strategy

필요성을 인식하게 된다. 이와 함께 논의과정에서 다른 학생들의 의견에 반박하고 방어하는 과정과 다른 학생들의 평가를 통해 자신의 모델을 평가받고, 그 결과를 토대로 자신의 모델을 수정한다. 이러한 일련의 과정을 거쳐 과학적 설명 체계인 모델을 정교화하게 된다. 학생들은 실제 세계에서 일어나는 현상을 관찰하여 과학적 개념으로 나타낸 설명을 하는데 있어 증거를 제시하고 과학적 언어를 사용하는 과정을 거치면서 추론하고 비판하고 스스로 되돌아보는 메타인지적 사고력을 키울 수 있다. ‘적용 과정’은 다음과 같은 요소들로 이루어져 있다. 첫째, 실제 세계의 현상을 관찰하여 나온 문제 또는 의문을 해결하기 위해 실험 설계, 실험 수행, 자료 분석을 한다. 둘째, 과학적 탐구와 추론과정을 통해 도출된 주장과 그 주장을 지지하거나 반박하기 위해 증거 제시의 중요성을 이해한다. 셋째, 논의를 통해 주장을 지지하거나 반박하기 위해 증거 제시의 중요성과 제시한 증거의 적절성을 이해한다. 넷째, 자신의 주장을 뒷받침하기 위해 다양한 증거 제시의 필요성을 인지하여 다중표상을 사용한다. 다섯째, 모델에 대한 평가와 수정을 통해 모델을 정교화하여 표현한다.

논의-기반 모델링 전략에서 각 stage에 따른 목적은 Figure 2에 제시하였다.

2. 논의-기반 모델링 전략의 적용

논의-기반 모델링 전략에서 각 Stage의 목적과 요소에 따라 논의-기반 모델링 전략을 적용하기 위한 수업의 절차 및 내용은 다음과 같다.

가. Stage 1: ‘인지 과정’의 절차 및 내용

‘인지 과정’에서 이루어지는 절차 및 내용은 다음과 같다. 첫째, 학생들은 과학 교과서에 사용된 표상을 직접 찾아본다. 이를 통해 글과 같이 하나의 표현으로만 나타난 단일 표상과 글 외에 그림, 그래프, 식, 화학기호 등으로 나타난 다중표상을 구별할 수 있다. 둘째, 교과서에서 과학적 개념과 이론을 포함한 과학적 설명에 대해 글로 쓴 것과 이를 그림, 표, 도표로 나타난 것의 차이점을 찾아보고 그 특징을 비교해 본다. 셋째, 학생들은 증거에서 제시되는 다중표상의 역할을 알아야 한다. 교사는 다양한 표상으로 나타난 과학적 설명을 제시하고, 그 내용에

따라 어느 표상이 이해하기 좋은지, 그 이유가 무엇인지, 글 외에 그림, 그래프, 도표, 공식의 역할이 무엇인지 물어본다.

#### 나. Stage 2: ‘해석 과정’의 절차 및 내용

‘해석 과정’에서 이루어지는 절차 및 내용은 다음과 같다.

첫째, 학생들은 시각적 표상인 표와 그래프의 작성 방법을 안다. 교사는 학생들에게 표의 경우 과학적 설명에서 나타나는 변인을 파악하여 구분하도록 하고, 그래프의 경우 제목과 축의 이름, 그 변화량을 화살표를 사용하여 나타내도록 이끌어준다.

둘째, 학생들은 하나의 표상을 다른 표상으로 바꾸는 ‘전환’을 한다. 교사는 학생들이 문장으로 나타난 과학적 설명을 그래프로 나타내고, 과학적 설명의 특징을 표로 나타내도록 한다. 또한 교사는 학생들에게 그래프에서 변인과 x축, y축, 화살표가 의미하는 것을 해석해서 글로 적어보게 하거나, 실험에서 나온 표를 그래프로 그리도록 한다.

셋째, 학생들은 책에서 주장과 증거를 찾고, 좋은 증거와 증거의 필요성을 이해해야 한다. 교사는 학생들이 책에서 과학적 개념, 이론, 법칙인 주장과 그 주장을 뒷받침하기 위해 이유, 실제생활의 예, 실험 방법, 그림, 도표, 그래프, 기호, 수학적 식 등의 다중표상으로 표현되는 증거를 찾게 한다. 교사는 학생들로 하여금 다중표상을 증거와 연결시켜 증거가 가져야 할 조건이 무엇인지 생각해보게 하고, 적어본 뒤 학급에서 발표하게 하여 학생들이 서로의 의견을 나눌 수 있도록 한다. 또한 하나의 개념을 여러 표상으로 나타냈을 때의 장점에 대해서 알고, 다중표상을 활용한 증거 제시의 필요성을 인식한다.

#### 다. Stage 3: ‘적용 과정’의 절차 및 내용

‘적용 과정’에서는 모델링에 대한 기초지식을 학습한 후 실제로 학생들이 모델링을 접해보는 과정이다. 이 연구에서는 서론에서 살펴본 모델링 단계에 대한 선행 연구를 바탕으로 아홉 개의 일련의 단계로 ‘적용 과정’을 구성하였다.

첫째, 질문 및 문제 만들기 단계이다. 과학은 현상에 대한 질문으로 시작된다. 학생들은 현상에 대해 경험적으로 대답할 수 있는 질문을 만들 수 있어야 한다.

둘째, 현상에 대한 질문을 해결하기 위한 실험 설계 단계이다. 기존의 과학 실험보고서에는 무엇을 써야 하는지, 어떻게 써야 하는지가 정해져 있어서, 학생들은 실험이 끝난 후에도 실험결과로부터 어떤 결론에 도달할 수 있는지에 대한 생각을 거의 하지 않고 실험에서 무엇을 알아보려고 했는지를 되돌아보지 않는다(Kim, 2003; Roychoudhury & Roth, 1996). 그러나 모델링 실습에서는 학생들이 교사의 명시적 지시 없이 자기 주도적으로 실험을 설계함으로써 과학적 추론과정을 통한 탐구 능력을 키울 수 있다.

셋째, 실험을 수행하는 과정에서 체계적인 관찰을 통한 조사 단계이다. 과학적 조사는 실험실이나 실제 상황에서 수행된다. 과학자들의 활동에서 중요한 단계가 바로 체계적 조사를 위한 계획을 하고 이에 따라 수행하는 것이다. 학생들은 실험 과정에서 체계적인 관찰, 실험 변인 등을 명확하게 파악하는 과정을 통해 과학자들이 갖추어야 할 자질을 키울 수 있다.

넷째, 자료의 분석 및 해석 단계이다. ‘자료의 분석’은 자료가 스스

로 설명되는 것이 아니므로 과학적 조사 결과로부터 의미를 도출해야 한다. 이는 과학자들이 표, 그래프적 해석, 시각화, 통계적 분석 등을 포함한 다양한 표상을 사용하여 자료의 중요한 특성과 패턴을 확인하는 과정이다. ‘해석’은 관찰한 현상에 대해 모델의 중요한 요소인 다중표상을 확인하는 것이다. 학생들은 모델의 결과를 표와 그래프로 나타내며 경험적 자료를 해석한다. 즉 표상의 종류를 결정하고, 자신의 모델을 만들면서 변인과 그 관계를 확인해야 한다(Hestenes, 1987). 이렇게 일정 시간동안 변인이 얼마나 증가하고 감소하는지를 보여주기 위해 표와 그래프 등의 다중표상으로 나타냄으로써 결과를 탐색하는 과정을 ‘모델 해석’이라고 명명하기도 한다(Hogan & Thomas, 2001).

다섯째, 현상의 관찰과 자료의 해석을 통해 설명을 위한 임시 모델을 설계한다. 과학의 목표는 실제 세계를 밝히기 위해 설명인 이론을 구성하는 것이다. 이론은 경험적 증거에 대해 여러 가지 독립적인 측면을 가지고 있으므로, 현상에 대한 이론의 구성을 통해 현상에 대한 설명의 폭, 설명력의 범위, 설명의 일관성을 가지게 된다. 현상의 관찰이나 조사 및 검증을 통해 실제와 모델을 비교하거나 현상의 중요한 속성과 특성에 대해 확인하고, 이를 증거로 하여 현상과 모델이 어떻게 관련이 되어있는지 상세하게 기술할 수 있다(Romberg *et al.*, 2005).

여섯째, 증거를 가지고 논의에 참여한다. 학생들은 설계된 임시 모델을 다른 사람과 공유하기 위해 증거를 바탕으로 설명해야 한다. 학생들은 논의과정을 통해 자신이 이해한 것을 다른 사람과 의사소통하기 위해서 타당한 증거로 뒷받침하여 자신의 주장을 설득력 있게 제시해야 한다. 과학에서 추론과 논의는 증거의 강점과 약점을 명확히 하고, 자연 현상에 대한 최상의 설명을 확인할 수 있는 과정이다. 과학자들은 자신의 설명을 방어하고, 구체적인 자료에 근거하여 증거를 형성하고, 다른 사람이 말한 증거와 비판을 이해하기 위해 조사하고 조사한 현상에 대한 최상의 설명을 찾기 위해 동료들과 협동해야 한다. 만약 과학자들이 발견한 것을 다른 사람에게 명확히 설득하거나 배우기 위해 의사소통을 할 수 없다면 과학은 진보할 수 없다. 따라서 학생들은 정보의 획득, 평가, 의사소통 과정을 실습해봄으로써 과학자가 하는 방법을 배우게 되고, 실제 세계에서 일어나는 문제를 해결할 수 있는 능력을 갖추는 것이다.

이와 같은 특징으로 인해 논의는 모델링 전략의 핵심이 된다. 과학에서 논의를 통한 실험은 탐구의 결과와 아이디어를 의사소통하기 위해 구두설명, 글쓰기, 표, 도표, 그래프, 식 등을 사용하고, 이에 대한 정보를 동료들과 교환하고 공유하는 것이다. 과학은 설명을 제안하는데 있어서 정보를 통합하고, 정보의 과학적 타당성을 평가하기 위해 다양한 과학적 글로부터 의미를 도출하는 능력을 필요로 한다. 그러므로 학생들은 모델링에서 사용된 다중표상을 이해할 수 있어야 하고 자신의 모델에서 표상을 사용한 증거로 지지할 수 있고, 다른 사람의 모델을 다중표상을 사용한 증거로 반박할 수 있어야 한다(Windschitl *et al.*, 2008b).

일곱째, 되돌아보기이다. 학생들은 논의과정에서 다른 모델을 접하게 되고, 친구들과 의견을 교환하게 된다. 논의 후, 학생들은 자신들의 증거 제시와 증거를 다중표상으로 나타내는 것에 대해서 되돌아보는 과정을 거치게 된다. 이를 통해 주장-증거 적절성을 높이고, 자신의 모델을 다른 사람에게 이해시키기 위해 다중표상을 사용한 증거로 제시하게 된다.

Table 2. Procedure and content of application process on Argument-based modeling strategy

Procedure	Strategy	
	Student	Teacher
1. 질문 또는 문제 만들기	· 학생들은 실제 세계를 관찰한 현상을 설명하기 위한 질문 및 문제를 만든다.	· 교사는 학생들이 일상생활에서 볼 수 있는 현상을 2-4가지로 제시하여 그 현상들을 포괄할 수 있는 질문이나 문제를 만들 수 있도록 이끈다.
2. 실험 설계하기	· 학생들은 질문을 해결하기 위한 실험을 설계한다.	· 교사는 학생들에게 명시적 지시 없이 학생 스스로 자기 주도적으로 실험을 설계하여 과학적 추론과정을 통한 탐구 능력을 키울 수 있도록 각 모듈에서 논의를 통해 실험방법을 결정할 수 있도록 격려해준다.
3. 실험 수행에서 관찰 통한 조사하기	· 학생들은 실험 수행과정에서 관찰을 통해 조사한다. · 학생들은 관찰한 것에 대한 의견을 모듈 내에서 서로 나누고, 실험 변인에 맞는 조사를 수행한다.	· 교사는 학생들에게 실험 변인이 무엇인지 인식하고, 실험 수행과정에서 일어나는 현상과 변화는 빠짐없이 관찰하도록 알려준다. · 교사는 학생들이 관찰한 것에 대한 의견을 모듈 내에서 나누도록 격려하고, 실험 변인에 맞는 조사를 수행하고 있는지 확인한다.
4. 자료의 분석 및 해석하기	· 학생들은 자료를 분석하고 다중표상을 사용하여 해석한다. · 학생들은 과학적 조사를 통해 도출된 자료를 분석하여 자료에서 나타나는 패턴을 확인한다.	· 교사는 학생들이 모듈내에서 의견을 나누며 자료를 분석할 수 있도록 격려한다. · 교사는 학생들이 결과로 나온 자료를 표, 그래프, 그림 등의 시각화 분석, 식 등의 통계적 분석을 포함한 다중표상으로 해석할 수 있도록 이끈다.
5. 임시 모델 설계하기	· 학생들은 자료의 해석에 대해 모듈내에서 합의에 의해 주장과 증거로 제시된 임시 모델을 만든다.	· 교사는 학생들이 자신들의 과학적 설명에서 주장과 함께 증거를 제시하도록 한다.
6. 논의하기	· 학생들은 설계된 임시 모델을 다른 사람과 공유하기 위해 증거를 바탕으로 발표하는 논의를 한다. · 학생들은 과학적 설명을 다른 사람과 의사소통하는 과정에서 자료에 근거하여 증거를 형성하고, 그 증거로 자신의 설명을 지지하고, 다른 사람의 반박을 이해하고 방어한다. · 모듈별로 이루어지는 논의과정에서 학생들은 가장 좋은 설득을 위해 모듈 내에서 자신들의 의견을 서로 모으게 되는 협상을 거친다.	· 교사는 학생들이 논의 과정을 통해 증거 제시의 필요성을 체득하도록 한다. · 교사는 학생들이 모듈 내에서 구성원들 사이의 협상 과정을 통해 능동적으로 지식을 재구성하게 되고, 증거의 가치에 대해서 알 수 있도록 이끈다.
7. 되돌아보기	· 학생들은 논의과정 후 다중표상을 사용하여 자기만의 주장과 증거로 적어보는 되돌아보는 과정을 거친다. · 학생들은 자신의 주장-증거 적절성을 높이고 다른 사람을 이해시키기 위해 다중표상을 사용한 증거로 제시된 모델을 만든다.	· 교사는 학생들이 논의과정 후에 자신만의 주장과 다중표상으로 제시된 증거로 나타내도록 한다. · 교사는 학생들이 자신만의 과학적 설명에서 다중표상을 사용한 증거로 제시할 때, 다른 사람을 이해시키고 높은 주장-증거 적절성을 가질 수 있도록 이끈다.
8. 모델 평가하기	· 학생들은 글과 논의과정에서 모듈별로 모델을 평가하기 위한 기준을 만들어 본다. · 모듈내에서 만든 기준을 가지고 논의를 통해 다른 모듈의 모델을 평가한다. · 자신들의 모델에 대한 다른 모듈의 평가 결과를 피드백으로 받는다.	· 교사는 학생들이 자신만의 모델을 만드는 과정 후에, 다시 모듈별로 모델을 평가하기 위한 기준을 만들도록 한다. · 교사는 학생들이 모듈 내에서 만든 기준을 가지고 논의를 통해 다른 모듈의 모델을 평가하여 긍정적인 점과 개선해야 할 점을 모두를 적어주도록 한다. · 교사는 학생들이 자신들의 임시모델에 대해 다른 모듈의 긍정적인 점과 개선해야 할 점을 받고 생각해보도록 한다.
9. 모델 수정하기	· 학생들은 모델 평가 과정을 거친 후에 자신들의 모듈의 모델을 수정하여 질문을 설명하는 자신만의 최종 모델을 만든다.	· 교사는 학생들이 증거를 바탕으로 한 논의과정을 통해 자신의 주장을 정당화하고 다른 사람과 의사소통으로 지식을 재구성하고 자신의 모델을 정교화 하도록 이끈다.

여덟째, 모델 평가하기이다. 모델을 평가하기 위한 기준을 만들고 이를 통해 모듈 내에서 논의를 통해 모델을 평가하는 것이다. 이러한 모델 평가의 목적은 주어진 현상을 보다 잘 묘사하고 설명하기 위한 것으로, 모델의 수정 활동을 이끈다(Sins *et al.*, 2005). 평가 과정에서 다른 사람의 의견을 듣게 되고, 이를 통해 모델의 수정이 이루어지게 된다. 이러한 점진적인 과정을 통해 모델은 정교화 된다. 모델의 평가 과정에서 학생들은 모듈 내에서 증거를 바탕으로 한 논의과정이라는 의사소통을 통해 자신의 주장을 정당화하게 되고 지식을 재구성하게 된다. 이러한 모델링 과정에서 과학적 탐구와 의사소통은 필수불가결한 부분이다(Giere *et al.*, 2006; Laubichler & Müller, 2007; Magnani & Nersessian, 2002; Morgan & Morrison, 1999).

아홉째, 모델 수정하기이다. 평가를 통해 경쟁하는 다른 모델과 비교해보고 합의된 모델을 구성하는 것이다. 모델의 수정은 학생들이 자신이 만든 모델과 예상 혹은 경험적으로 확인된 패턴 사이의 적합한 정도를 평가하는 과정으로 정의된다. 초보자가 모델자로서 활동을 할 때, 특별한 추론 과정에서 통찰력을 얻기 위해서 모델의 수정 과정에 대한 결과와 질을 조사할 필요가 있다(Sins *et al.*, 2005). 수정의 목적

은 현상을 잘 나타내는 모델을 만들고, 상상이 아니라 모델의 사용 목적에 맞도록 모델을 사용하기 위함이다. 모델의 수정은 모델의 사용 방법을 배운 학생들이 모델의 변경 방법에 대해 배우는 과정을 의미한다(Gilbert, 2004).

Table 2에는 논의기반 모델링 전략의 ‘적용 과정’의 절차 및 내용이 제시되어 있다.

논의기반 모델링 전략의 적용 과정에서 ‘논의’는 임시모델을 발표하는 모듈간 논의와 그 외의 다른 단계에서 사용되는 모듈 내 논의를 포함하는 것으로 논의기반 모델링 전략의 여러 과정에서 사용된다(Figure 3). 이때 실선은 모듈 내 논의가 이루어지는 과정을 표시한 것으로, 자신의 질문 및 의문을 만든 뒤에 모듈 내의 ‘질문 및 의문을 만드는 것’과 ‘실험 설계 및 수행’, ‘관찰을 통한 조사’, ‘자료 분석 및 해석’, 모듈의 주장과 증거로 ‘임시모델 만들기’, 다른 모듈의 모델에 대해 피드백을 주는 ‘모델 평가하기’이다. 점선은 학급 전체에서 이루어지는 모듈 간 논의가 이루어지는 과정을 표시한 것으로, 모듈에서 정한 질문 및 문제를 ‘학급의 질문 및 문제로 정하는 것’과 ‘발표하기’를 통해 다른 모듈의 모델을 듣고 의견을 제시하는 과정에서 이



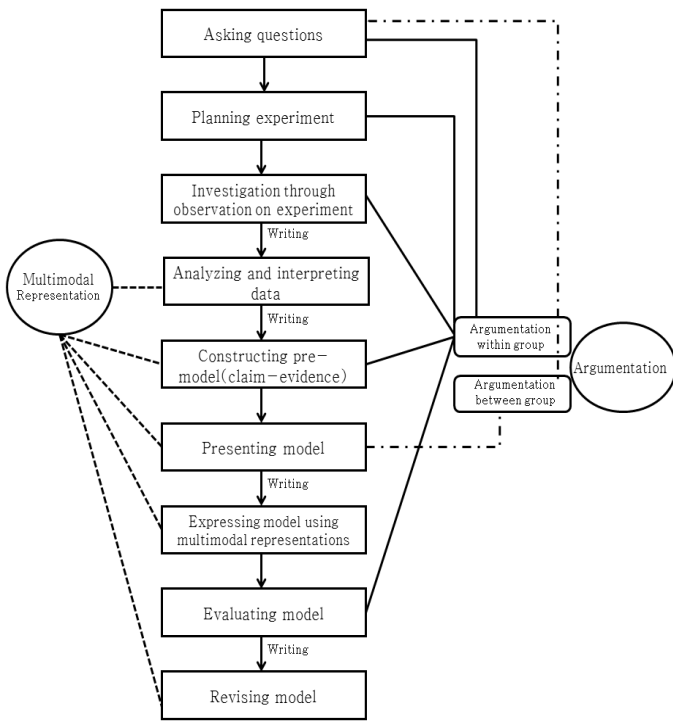


Figure 3. Steps of the application in argument-based modeling strategy

루어진다.

#### IV. 결론 및 제언

이 연구는 학생들이 관찰한 자연 현상에 대해 과학적 설명을 만들고 수정하는 일련의 과정인 모델링에서 모델링 능력을 향상시키기 위한 글쓰기를 바탕으로 하는 논의-기반 모델링 전략을 개발하는 것을 목적으로 하였다.

모델은 계의 중요한 특성을 설명하기 위한 단순화 및 추상화한 표상 (Gobert & Buckley, 2000)이다. 특히 과학적 모델은 자연 현상이나 과정에 대한 아이디어를 설명하거나 나타내는 도구로(Kim & Kim, 2007), 과학개념이나 표상의 체계이다(Chamizo, 2013; Ha et al., 2009; Halloun, 2006). 모델링은 학생들이 가진 인지적 요소들의 조합인 ‘정신 모델’을 과학적 지식에 부합되는 ‘표현된 모델’로 변화하는 과정이다(Redish, 1994). 이는 경험적 증거로 모델을 평가하고 수정하는 일련의 과정을 거쳐 모델을 발달시키는 것을 의미한다(Suckling et al., 1978). 이를 통해 학생들이 자신이 이해한 것을 반성할 수 있는 기회를 제공(Gilbert et al., 1998; Schecker, 1993)함으로써 과학적 지식의 구성 및 평가 과정에 도움을 준다(Lehrer & Schauble, 2006; Lesh & Doerr, 2000; Schwarz & White, 2005; Stewart et al., 2005). 모델링 실습에서 학생들에게 모델의 단계를 안내하지 않고 모델의 본성이나 목적만을 설명하려고 하는 것은 학생들에게 큰 효과가 없으므로 (Schwarz et al., 2009), 학생들에게 모델링에 대한 단계를 명확하게 인식시킬 필요가 있다.

논의-기반 모델링은 학생들이 실제 세계에서 관찰한 현상에 대한 과학적 설명체계에 대해 다중표상을 사용하여 증거를 제시함으로써 설득력 있는 주장을 하고, 다른 사람에게 자신의 모델을 평가받고 수정함으로써 정교화하는 과정을 의미한다. 학생들은 동료집단 내에서 이

루어지는 논의과정을 통해 다른 학생들의 다양한 의견들을 접하고 자신의 의견의 정당성과 타당성을 판단하는 비판적 사고력을 키우게 된다. 또한 이를 통해 과학 학습뿐만 아니라 다른 교과의 학습 능력 향상도 가능하게 할 수 있다(Schwarz, 2009).

논의-기반 모델링 전략은 크게 두 가지 측면으로 이루어져 있다. 첫째, 다중표상에 대한 이해를 통해 성공적인 모델링 실습을 이룰 수 있다. 과학적 모델은 표상이고, 이들 표상은 언어적, 시각적, 물리적, 물질적 등의 다중표상으로 나타나기 때문이다(Gilbert & Boulter, 1997; Gobert & Buckley, 2000; Windschitl et al., 2008a). 학생들은 실제 세계에서 관찰한 현상에 대해 설명체계인 모델을 만들기 위해서는 과학적 개념인 주장에 대해 증거를 뒷받침해야 하고, 그 증거는 다양한 표상으로 제시되어야 한다. 이를 위해 논의-기반 모델링 전략의 ‘인지 과정’과 ‘해석 과정’을 구성하였다. 학생들은 다중표상에 대한 이해를 위한 ‘인지 과정’에서 제시된 정보로부터 다중표상을 구분하고, 다중표상의 역할을 알게 된다. 이러한 ‘인지 과정’은 단일 표상과 다중표상의 구별, 단일 표상과 다중표상의 차이점과 특징에 대한 이해, 다중표상의 역할에 대한 이해의 세 가지 요소로 이루어져 있다. ‘해석 과정’은 다중표상 각각의 특징을 알고 정확하게 사용하는 방법을 습득함으로써 하나의 표상을 다른 표상들로 전환하는 것을 배우는 과정이다. 이러한 다중표상 활동을 통해 학생들은 주장을 할 때 증거의 중요성을 인식하게 되고, 다중표상을 사용하여 증거를 제시 할 수 있게 된다.

둘째, 학생들은 논의를 기반으로 한 모델링을 실습해보는 ‘적용 과정’을 통해 모델링을 직접 접하게 된다. 이러한 과정을 통해 증거 제시의 중요성을 인식하게 되고, 논의과정에서 모둠 내에서 기준을 정해서 다른 모둠의 모델을 평가하거나 평가받고, 그 결과를 통해 모델을 수정하는 일련의 과정을 거쳐 자신들의 모델을 정교화하게 된다. 따라서 학생들은 모델링을 통해 과학적 설명을 다른 사람에게 전하는 기회를 갖게 되고, 논의과정을 통해 다른 사람과 의사소통을 하게 된다. 또한 의사소통을 바탕으로 자신의 주장과 증거 사이의 적절성을 알게 되고, 증거 제시의 중요성과 다중표상으로 나타난 증거 제시의 필요성을 인식하게 된다. 이와 함께 논의과정에서 이루어지는 타인의 평가를 통해 자신의 모델을 평가받고, 그 결과를 토대로 자신의 모델을 수정한다. 이러한 일련의 과정을 거쳐 과학적 설명 체계인 모델을 정교화하게 된다. 이러한 논의와 글쓰기를 통해 모델링을 접해보는 ‘적용 과정’은 아홉 개의 단계로 이루어진다. 학생들은 실제 세계를 관찰한 현상을 설명하기 위한 질문 및 문제를 만든다. 학생들은 질문을 해결하기 위한 스스로 실험을 설계하고 수행한다. 학생들은 실험 수행과정에서 관찰을 통해 조사하면서 관찰한 것에 대한 의견을 모둠 내에서 서로 나누고, 실험 변인에 맞는 조사를 수행하고 있는지 확인한다. 학생들은 자료를 분석하고 다중표상을 사용하여 해석한다. 학생들은 자료의 분석과 해석에 대해 모둠의 주장과 이 주장을 뒷받침하기 위한 증거로 제시된 임시 모델을 만들으로써 학생들은 현상의 관찰과 자료의 해석을 바탕으로 과학적 설명을 하게 된다. 학생들은 설계된 임시 모델을 다른 사람과 공유하기 위해 증거를 바탕으로 발표하는 논의과정을 통해 증거 제시의 필요성을 체득할 수 있게 된다. 학생들은 논의과정 후 자신들의 제시한 증거를 다중표상으로 나타내는 것에 대해서 되돌아보는 과정을 거치게 되어 주장-증거 적절성을 높이고 다른 사람을 이해시키기 위해 다중표상을 사용한 증거로 제시된 모델을 만들게 된

다. 학생들은 모둠별로 모델을 평가하기 위한 기준을 만들고 이를 통해 모둠 내에서 논의를 통해 다른 모둠의 모델을 평가하고 자신들의 모델에 대한 다른 모둠의 평가 결과를 피드백으로 받게 된다. 즉 학생들은 증거를 바탕으로 한 논의과정을 통해 자신의 주장을 정당화하고 다른 사람과 의사소통으로 지식을 재구성한 자신의 모델을 정교화하여 글쓰기를 통해 최종모델을 나타내는 것이다.

**국문요약**

이 연구는 과학교육에서 의사소통을 위해 글쓰기와 논의를 활용한 논의-기반 모델링 전략의 개발을 목적으로 하였다. 논의-기반 모델링 전략은 모델링의 목적인 의사소통을 위해 자신이 만든 모델을 논의와 글쓰기를 통해 과학적 언어를 사용하여 스스로 정리하거나 표현하고, 다른 사람의 의견을 듣고 교환하는 과정을 통해 모델을 평가하고 수정하는 일련의 과정을 의미한다. 이 전략은 과학교육에서 모델링에 어려움을 느끼는 학생과 교사를 지원하기 위한 것으로 다음 네 가지 요소의 발달에 초점을 맞추었다. 첫째 여러 문제 상황을 관찰하여 문제를 연관 지어 인식하는 문제인식이다. 둘째는 과학적 설명을 위해 충분한 과학 개념을 구조화하여 제시하는 과학개념 구조화이며, 셋째는 주장에 대해 적절한 표상을 증거로 제시하는 주장-증거 적절성이다. 마지막은 증거제시에서 다양한 표상의 사용과 이 표상들을 전환하고 통합하는 다중표상 지수이다. 이 네 가지 요소의 발달을 위해 세 가지 stage를 구성하였다. ‘인지 과정’은 다중표상에 대한 이해를 위한 것이고, ‘해석 과정’은 다중표상 활동을 통해 증거 제시의 중요성을 인식하는 것이며, ‘적용 과정’은 학생들이 논의-기반 모델링을 직접 접해보는 것이다. 이 적용 과정에서는 질문 또는 문제 만들기-실험 설계 및 수행하기-관찰 통한 조사하기-자료의 분석 및 해석하기-임시 모델 설계하기-논의하기-되돌아보기-모델 평가하기-모델 수정하기의 아홉 개의 단계로 이루어진다. 논의-기반 모델링 전략은 학생들이 자신이 설계한 임시 모델을 다른 사람과 공유하기 위해 증거를 바탕으로 발표하고 반박하는 논의과정을 통해 증거 제시의 필요성을 인식할 수 있다. 논의과정 후 학생들은 주장과 증거를 다중표상으로 나타내는 것에 대해 되돌아보는 과정을 거치면서 주장-증거 적절성을 높게 된다. 또한 모델을 평가하기 위한 기준을 만들고, 이를 바탕으로 자신의 모둠이나 다른 모둠의 모델을 평가하고 그 결과를 피드백 받으면서 수정하게 된다. 이러한 일련의 과정을 거치면서 관찰한 자연세계의 현상에 대한 자신의 설명체계를 만들으로써 과학적 지식을 형성할 수 있는 기회를 제공 받을 수 있다.

**주제어 :** 모델, 모델링, 논의-기반 모델링, 다중 표상, 글쓰기, 논의

**References**

Anderson, C. W., & Smith, E. L. (1987). Teaching science. In Koehler-Richardson (Eds.), *Educators' handbook: A research perspective* (pp. 84-111). White Plains, NY: Longman.  
 Bell, T., Urhahne, D., Schanze, S., & Ploetzner, R. (2010). Collaborative inquiry learning: models, tools, and challenges. *International Journal of Science Education*, 32(3), 349-377.  
 Bliss, J. (1994). From mental models to modelling. In H. Mellar, J. Bliss, R. Boohan, J. Ogborn, & C. Thompsett (Eds.), *Learning with artificial*

*worlds: Computer based modelling in the curriculum* (pp. 27-33). London: The Falmer Press.  
 Boulter, C. J., & Buckley C. B. (2000). Constructing a typology of model for science Education. In J. K. Gilbert & C. Boulter (Eds.), *Developing models in Science Education* (pp. 41-57). Boston, MA: Kluwer Academic Publisher.  
 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.  
 Bybee, R. W. (2011). Scientific and engineering practices in K-12 classrooms: Understanding a framework for K-12 science education. *Science and Children*, 49(4), 10-16.  
 Carey, S., & Smith, C. (1993). On understanding the nature of scientific knowledge. *Educational Psychologist*, 28(3), 235-251.  
 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.  
 Chabalengula, V., & Mumba, F. (2012). Promoting biological knowledge generation using model-based inquiry instruction. *International Journal of Biology Education*, 2(1), 1-24.  
 Chamizo, J. A. (2013). A new definition of models and modeling in chemistry' teaching. *Science & 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.  
 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. (2008). *Creative model construction in scientists and students*. New York, NY: Springer.  
 Clement, J. J., & Rea-Ramirez, M. A. (2008). *Model based learning and instruction in science*. New York, NY: Springer.  
 Coll, R. K. (2005). The role of models/and analogies in science education: Implications from research. *International Journal of Science Education*, 27(3), 183-198.  
 Coll, R. K., & Treagust, D. F. (2003). Investigation of secondary school, undergraduate, and graduate learners' mental models of ionic bonding. *Journal of Research in Science Teaching*, 40(5), 464-486.  
 Davenport, T. H., & Prusak, L. (1997). *Working knowledge: How organizations manage what the know*. Boston, MA: Harvard business school press.  
 DeBoer, G. E. (1991). *A history of ideas in science education: Implications for practice*. New York, NY: Teachers College Press.  
 Francoeur, E. (1997). The forgotten tool: The design and use of molecular models. *Social Studies of Science*, 27(1), 17-40.  
 Fortus, D., Hug, B., Krajcik, J., Kuhn, L., McNeill, K., Reiser, B., ... & Shwartz, Y. (2006). Sequencing and supporting complex scientific inquiry practices in instructional materials for middle school students. In *Annual Meeting of the National Association for Research in Science Teaching*, San Francisco, CA.  
 Giere, R. (1988). *Explaining science*. Chicago, IL: University of Chicago Press.  
 Giere, R., Bickle, J., & Mauldin, R. (2006). *Understanding scientific reasoning*. London: Thomson Learning.  
 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., & 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.  
 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, J. K., Boulter, C. J., & Rutherford, M. (2000). Explanations with models in science education. *Developing Models in Science Education*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer.
- Gilbert, S. W. (1991). Model building and a definition of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 28(1), 73-79.
- Gilbert, S. W., & Ireton, S. (2003). *Understanding models in earth and space science*. Arlington, VA: NSTA Press.
- Gobert, J. D. (2005). The effect of different learning tasks on model-building in plate tectonics: Diagramming versus explaining. *Journal of Geoscience Education*, 53(4), 444-455.
- 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, C., 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.
- 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.
- 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.
- Haack, S. (2003). *Defending science-within reason: Between scientism and cynicism*. Amherst, NY: Prometheus Books.
- Hand, B., Choi, A., Greenbowe, T., Schroeder, J., & Bennett, W. (2008). Examining the impact of student use of multiple-mode representations in constructing science arguments. In *Annual International Conference of National Association for Research in Science Teaching*, Baltimore, MD.
- Hand, B., Wallace, C., & Yang, E. (2004). Using a Science Writing Heuristic to enhance learning outcomes from laboratory activities in seventh-grade science: Quantitative and qualitative aspects. *International Journal of Science Education*, 26(2), 131-149.
- Halloun, I. A. (1996). Schematic modeling for meaningful learning of physics. *Journal of Research in Science Teaching*, 33(9), 1-26.
- Halloun, I. A. (2006). *Modeling theory in science education*. Dordrecht, Netherlands: Springer.
- Halloun, I. A. (2007). Mediated modeling in science education. *Science and Education*, 16(7-8), 653-697.
- Halloun, I. A., & Hestenes, D. (1985). Common sense concepts about motion. *American Journal of Physics*, 53(11), 1056-1065.
- 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. (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, 85-142.
- Hogan, K., & Thomas, D. (2001). Cognitive comparisons of students' systems modelling in ecology. *Journal of Science Education and Technology*, 10(4), 319-345.
- Jackson, J., Dukerich, L., & Hestenes D. (2008). Modeling instruction: An effective model for science education. *Science Educator*, 17(1), 11-17.
- Johnson-Laird, P. N. (1983). Mental models: Towards a cognitive science of language, inference and consciousness. Cambridge: Cambridge University Press.
- 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. (2002a). 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. (2002b). Science teachers' knowledge about and attitudes toward the use of models and modeling in learning sciences. *International Journal of Science Education*, 24(12), 1273-1292.
- Kang, I. A. (1997). A brief reflection on cognitive and social constructivism. *Journal of Educational Technology*, 11(2), 3-20.
- Kelly, G. J., & Takao A. (2001). Epistemic levels in argument: An analysis of university oceanography students' use of evidence in writing. *Science Education*, 86(3), 314-342.
- Kelly, G. J., Bazerman, C., Skukauakaite, A., & Prothero, W. (2002). Rhetorical features of student science writing in introductory university oceanography (pp. 265-282). New York, NY: Routledge Publishers.
- Kim, H. G. (2003). Middle school students' open physics inquiry emphasizing peer argumentation: Its conditions, features, and roles (Doctoral dissertation). Seoul National University, Korea.
- 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.
- Kuhn, D. (1989). Children and adults as intuitive scientists. *Psychological Review*, 96(4), 674-689.
- Kwon, Y. J., Jeong, J. S., Park, Y. B., & Kang, M. J. (2003). Focused on inductive, abductive, and deductive processes: A philosophical study on the generating process of declarative scientific knowledge. *Journal of the Korean Association for Research in Science Education*, 23(3), 215-228.
- Laubichler, M., & Müller, G. (2007). *Modeling biology: Structures, behaviors, evolution*. Cambridge, MA: MIT.
- Layton, D. (1973). *Science for the people: The origins of the school science curriculum in England*. London, England: Allen & Unwin.
- 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. S. (2002). *Principles and methods of teaching writing: Process-oriented approach*. Seoul: Teaching the history of science Publishers.
- Lee, K. N. (2007). Effects of constructivistic learning strategy on middle school students' learning of scientific conception learning and scientific attitudes: Focused on science writing (Doctoral dissertation). Chonbuk National University, Korea.
- 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.
- Lehrer, R., & Schauble, L. (2006). Scientific thinking and science literacy: Supporting development in learning in contexts. In W. Damon, R. M. Lerner, K. A. Renninger, & I. E. Sigel (Eds.), *Handbook of child psychology* (6th ed., Vol. 4). Hoboken, NJ: John Wiley and Sons.
- Lemke, J. L. (1998). Multiplying meaning: Visual and verbal semiotics in scientific text. In J. Martin & R. Veel (Eds.), *Reading science: Critical and functional perspectives on discourses of science* (pp. 87-113). London: Routledge.
- Lesh, R., & Doerr, H. M. (2000). Symbolizing, communicating, and mathematizing: Key components of models and modeling. In P. Cobb, E. Yackel, & K. McClain (Eds.), *Symbolizing and communicating in mathematics classrooms: Perspectives on discourse, tools, and instructional design* (pp. 361-383). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Magnani, L., & Nersessian, N. (2002). *Model-based reasoning: Science, technology, values*. New York, NY: Kluwer Academic Publishers.
- Mandinach, E. B. (1988). The cognitive effects of simulation-modelling software and systems thinking on learning and achievement. Paper

- presented at the annual meeting of the American Educational Research Association, New Orleans, LA.
- Morgan, M., & Morrison, M. (1999). *Models as mediators. Perspectives on natural and social sciences.* Cambridge: Cambridge University Press.
- Nam, J. H., Kwak, K. H., Jang, K. H., & Hand, B. (2008). The implementation of argumentation using Science Writing Heuristic (SWH) in middle school science. *Journal of the Korean Association for Research in Science Education*, 28(8), 922-936.
- National Research Council. (2000). *Inquiry and the national science education standards.* Washington, DC: National Academy Press.
- National Research Council. (2011). *A framework for K-12 science education: Practices, cross-cutting concepts, and core Ideas.* Washington, DC: The National Academies 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.
- Norman, D. N. (1983). Some observations on mental models. In D. Genterve Stevens, A. L. (Eds.), *Mental models* (pp. 7-14). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Ogan-Bekiroglu, F. (2007). Effects of model-based teaching on preservice physics teachers' conceptions of the moon, moon phases, and other lunar phenomena. *International Journal of Science Education*, 29(5), 555-593.
- Oh, P. (2005). A theoretical study on abduction as an inquiry method in earth science. *Journal of the Korean Association for Research in Science Education*, 25(5), 610-623.
- Oh, P., & Oh, S. (2011). What teachers of science need to know about models: An overview. *International Journal of Science Education*, 33(8), 1109-1130.
- Owens, C. V. (2000). Teachers' responses to science writing. *Teaching and learning-grand forks-*, 15(1), 22-35.
- Pineda, L., & Garza, G. (2000). A model for multimodal reference resolution. *Computational Linguistics*, 26(2), 139-193.
- Redish, E. F. (1994). The implications of cognitive studies for teaching physics. *American Journal of Physics*, 62(9), 792-803.
- 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.
- 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.
- Roychoudhury, A., & Roth, W. M. (1996). Interaction in an open-inquiry physics laboratory. *International Journal of Science Education*, 18(4), 423-445.
- Sarah K. B., & Lance J. R. (2000). Explanation and evidence in informal argument. *Cognitive Science*, 24(4), 573-604.
- Schecker, H. P. (1993). Learning physics by making models. *Physics Education*, 28(2), 102-106.
- Schecker, H. P. (1994). System dynamics in high school physics. *Proceedings of the 1994 International System Dynamics Conference*, Stirling, Scotland (pp. 74-84).
- 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 science 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.
- Seigel, H. (1988). *Education reason: Rationality, critical thinking and education.* London: Routledge.
- 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.
- Suckling, C. J., Suckling, K. E., & Suckling, C. W. (1978). *Chemistry through models. Concepts and applications of modeling in chemical science, technology and industry.* Cambridge: Cambridge University Press.
- Stewart, J., Cartier, J. L., & Passmore, C. M. (2005). Developing understanding through model-based inquiry. In M. S. Donovan & J. D. Bransford (Eds.), *How students learn* (pp. 515-565). Washington, DC: National Research Council.
- Stewart, J., Hafner, R., Johnson, S., & Finkel, E. (1992). Science as model building: Computers and high-school genetics. *Educational Psychologist*, 27(3), 317-336.
- Sun D., & Looi C. K. (2013). Designing a web-based science learning environment for model-based collaborative inquiry. *Journal of Science Education and Technology*, 22(1), 73-89.
- Tomasi, J. (1988). Models and modelling in theoretical chemistry. *Journal of Molecular Structure*, 179(1), 273-292.
- Treagust, D. F., Chittellborough, 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.
- 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.
- Vosnadiu, S. (1994). Capturing and modeling the process of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4(1), 45-69.
- Webb, M. E. (1994). Beginning computer-based modelling in primary schools. *Computers in Education*, 22(1), 129-144.
- Wells, M., Hestenes, D., & Swackhamer, G. (1995). A modeling method for high school physics instruction. *American Journal of Physics*, 63(7), 606-619.
- 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.
- White, B. Y., Frederiksen, J., Frederiksen, T., Eslinger, E., Loper, S., & Collins, A. (2002). Inquiry Island: Affordances of a multi-agent environment for scientific inquiry and reflective learning. In: *Proceedings of the 5th international conference of the learning sciences (ICLS)*, Erlbaum, Mahwah, NJ.
- Windschitl M., Thompson J., & Braaten M., (2008a). 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., & Braaten, M. (2008b). How novice science teachers appropriate epistemic discourses around model-based inquiry for use in classrooms. *Cognition and Instruction*, 26(3), 310-378.
- Tapio, I. (2007). Models and modeling in physics education: A critical re-analysis of philosophical underpinnings and suggestions for revisions. *Science & Education*, 16(7-8), 751-773.