

# 계절의 변화 원인에 대한 설명에서 나타난 초등학생의 개념 시뮬레이션 사례 연구

고민석 · 김나영 · 양일호\*

한국교원대학교

## A case study on the conceptual simulation observed in explanation of elementary school students about the causes of the seasonal change

Ko Min-seok · Kim Na-young · Yang Il-ho\*

Korea National University of Education

### ABSTRACT

The purpose of this study is to analyze the conceptual simulation observed when students are thinking about the causes of the seasonal change, identifying how students come up with the explanation. For this study, a framework for conceptual simulation process and strategy based on literary research was developed and its validity was proved by four experts in the field of science education. The results were as in the following: First, through the process of explaining the causes for seasonal change, students usually base their explanation on perceptual experience learned from model experiments from a science class. Besides, construct of thought experiment using the familiar object or analogize of the familiar perceptual experience. These all contributed to on explanation firmly. Second, errors from mental simulation were found in the statement of initial representation and running imagistic simulation. It happened when statement of initial representation is not in a complete and secure state or when participants think of an inappropriate situation during running imagistic simulation. Third, the study identified that the use of strategies like 'removal' and 'replace' was shown to enhance the effects of conceptual simulation particularly in regard with solar attitude at meridian passage.

**Key words** : conceptual simulation, thought experiment, the causes of the seasonal change

## I. 서 론

### 1. 연구의 필요성 및 목적

지구과학 교육에서 다루고 있는 많은 자연 현상들이 대부분 교실에서 다루기에 거대한 영역들로 이를 학습하는 학생들에게 공간적인 추론 능력을 요구한다(Orion et al., 1997; Kali et al., 1997). 특히, 계절의 변화 원인은 천체의 공간적 움직임에 대한 이해를 필요로 하고, 높은 수준의 추상화와 메커니즘 수준의 추론이 요구하기 때문에 이해하는데 어

려움을 겪고 있는 부분이다(Chae, 2011; Kim, 2012; Lightman & Salder, 1993; Zeilik & Bisard, 2000). 이에 많은 교사들이 지구과학 현상을 가르치기 위해 사진, 삽화, 모델, 모의실험 등을 통해 자연 현상의 모델을 시각화하여 이해를 돕고 있으며, 이를 통해 복잡한 지구 환경의 역동적인 변화의 모습을 시공간적으로 탐색하도록 돕는다(Katz et al., 2005). 하지만 교사들은 여전히 다양한 시각화 자료를 통해 자료와 실제 지구와의 관계를 효과적으로 설명하는데 어려움을 가지고 있다(Kastens & Rivet, 2008; Kim, 2012). 이처럼 천체의 운동과 관련된 계절의 변화

원인의 개념은 학생들이 이해하는 데 어려움을 겪고 있는 부분이며, 교사 역시 효과적인 설명을 제공하는 데 어려움을 겪고 있는 부분이다. 따라서 과학 교육에서 계절의 변화 원인에 대한 학생들의 이해를 돕고, 교수 전략에 대한 시사점을 찾기 위해서는 먼저 학생들이 어떠한 부분에서 잘못된 설명을 만들고 있는지, 또 어떠한 사고를 통해 계절의 변화 원인 개념에 대한 이해를 확고히 하고 있는지를 파악해야 할 필요가 있다.

이를 위해 이 연구는 학생들이 계절의 변화 원인에 대한 설명을 만드는 과정을 분석하고 자 한다. 과학 교육에서 학생들에게 과학적 현상에 대한 설명을 만들고, 수정 및 개선해 나가는 기회를 부여하는 것은 중요하게 다루어져야 할 부분이며, 학생들은 과학적 현상에 대한 설명을 시도함으로써 설명을 정교화 할 수 있고, 교사의 적절한 피드백과 스캐폴딩을 통해 학생들 스스로 과학적 개념에 부합하는 정신모델을 구성할 수 있다(Berland & Reiser, 2009; Clement, 2000; Gobert & Buckley, 2000; Schwarz et al., 2009). 또한 학생들이 설명을 만들고, 수정하는 과정은 학생들이 가지고 있는 정신 모델의 현재 상태를 명료하게 드러내어 주므로 교사는 학생들이 설명을 만드는 과정을 분석하여 과학적 개념에 대한 이해 정도를 확인할 수 있다.

개념 시뮬레이션(conceptual simulation)은 지식을 언어로 저장하는 것이 아니라 사용하게 해 주며, 학생들이 가지고 있는 정신 모델을 드러내어 주기 때문에 설명 과정에서 학생들의 개념 시뮬레이션을 분석하는 것은 과학적 개념을 어떻게 이해하여 사용하고 있는지를 알아보기에 효과적인 방법이다. 개념 시뮬레이션은 이론이나 개념에 근거하여 초기 표상을 떠올리고, 표상을 공간적으로 조작 및 변환하여 결과를 확인하는 사고과정으로(Trafton et al., 2005; Trickett & Trafton, 2002, 2007), 설명을 만드는 과정에서 중요한 역할을 하고 있다(Clement, 2008; Nersessian, 2008). 이러한 개념 시뮬레이션의 사고 과정은 초기 표상, 시뮬레이션 실행, 결과 확인의 과정을 거친다(Trickett et al., 2007, 2009). 즉 장기 기억 속에 저장되어 있는 관련 지식, 경험 현상의 기억에 근거하여, 또는 제시된 자료의 이미지를 수정하여 초기 표상을 진술하고, 문제 상황에 맞게 의식적으로 초기표상을 조작 및 변환하여 나타냄으로써 문제 상황에 대한 메커니즘이나 개념을 드러낸다

(Trafton et al., 2005). 개념 시뮬레이션에 대한 선행 연구는 과학에서 새로운 지식을 생성하는데 기여한 사고실험 사례에 대한 철학적 기반의 연구에서 시작되었으며(Galili, 2009; Gilbert & Reiner, 2000), 새로운 지식을 만드는 과정에서 나타난 자발적 사고 실험의 생성(Clement, 2008; Nersessian, 2008)에 대한 연구를 기반으로 하고 있다. 최근 Trickett과 Trafton(2007)과 Trickett 등(2009)은 이와 같은 연구에 기반하여 과학자와 공학자들의 실제 연구 과정에서 나타나는 개념 시뮬레이션의 과정을 분석하기 위한 방법을 제시하기도 하였다. 이와 같은 연구들에서 개념 시뮬레이션은 개념과 지각적 경험에 기반하여 불확실한 상황에 대한 설명과 예측을 만드는 멘탈 시뮬레이션의 특별한 사례이며(Clement, 2008; Nersessian, 2008), 과학자 및 공학자들이 개념과 지각적 경험을 사용하여 새로운 지식을 생성하는데 기여한 중요한 사고과정으로 보고되고 있다(Ball & Christensen, 2009; Clement, 2008; Nersessian, 2009). 하지만 지금까지 개념 시뮬레이션에 대한 연구는 주로 과학자나 공학자, 성인들에 대한 연구에 제한되며, 이 연구에서는 과학 교육과 관련하여 초등학생들의 자발적인 개념 시뮬레이션의 사례를 탐색하고자 한다.

이와 같은 개념 시뮬레이션의 실행은 과학교육에서 교수 전략으로서 사용될 가치를 가지고 있다. 과학교육에서 학생들이 가지고 있는 정신모델을 정교화 하기 위해 기존 모형의 일부를 변형시켜 학생들이 이해하기에 용이한 친숙한 상황으로 만들어 줄 수 있으며, 이러한 모형의 구조적인 변화는 학생들에게 변화된 상황을 관찰하도록 하여 메커니즘에 대한 이해를 돕는다(Griffith, 2000; Khan, 2008). 따라서 초등학생들의 계절의 변화 원인 설명 과정에서 모형의 일부를 조작 및 변환하여 자발적으로 생성한 개념 시뮬레이션의 사례를 확인하는 것은 초등학생의 수준에서 개념을 이해하기 위해 어떠한 설명이 필요한지를 알 수 있도록 해 줄 것이다.

이상과 같이 과학교육에서 초등학생들의 개념 시뮬레이션을 분석하는 것은 다음과 같은 의미를 갖는다. 첫째, 초등학생들의 과학적 개념에 대한 이해 정도를 확인할 수 있으며, 설명하는 과정에서 나타나는 실수를 확인할 수 있다. 둘째, 초등학생의 수준에서 과학적 개념을 설명하기 위해 사용한 성공적인 전략을 분석할 수 있다. 이에 이 연구는 계절의 변화 원인을 설명하는 과정에서 초등학생들이 실제

개념을 사용하는 자발적인 개념 시뮬레이션의 생성 사례를 분석하여, 개념 시뮬레이션 과정에서 나타나는 실수와 계절의 변화 원인의 이해를 도울 수 있는 성공적인 전략의 사용을 탐색하고자 한다.

## II. 연구 방법

### 1. 연구 참여자

이 연구에서 연구 참여자의 선정은 W 초등학교 6학년 학생을 대상으로 의도적 표본추출 전략을 사용하여 선정 하였다. 먼저 6학년 전체 학생 217명을 대상으로 질문지를 통해 계절의 변화 원인에 대한 자료를 수집하였으며, 이 중 다양한 정신 모델을 가진 41명의 학생을 1차로 선정하였다. 선정된 연구의 참여자들은 모두 자발적으로 연구에 참여하였고, 사전에 연구의 목적과 방법에 대해 충분히 안내한 후 연구에 대한 동의를 받았다. 연구 참여자 41명을 대상으로 심층 면담과 관찰기록, 학생과 담임 교사의 설문 자료 등을 수집하였으며, 수집된 자료를 Libarkin (2003)의 정신 모델 분류 기준에 따라 Native mental mode(NM), Unstable mental model(UM), Conceptual framework(CF), Conceptual model(CM)의 4가지로 분류하였다. NM유형은 문제 상황에서 직관적이고 무의식적으로 구성되는 정신 모델이며, UM유형은 유동적이고 부정확한 정신모델이다. CF유형은 정확한 현상을 설명하지만 일부 대안 개념을 포함하고 있는 정신 모델의 유형이며, CM유형은 학습자가 개념을 조직화하여 현상을 예측하고 설명하는 정신 모델의 유형이다. 이 중 개념 시뮬레이션의 사례는 CF와 CM유형에서 나타났으며, 이에 CF와 CM 유형으로 나타난 초등학교 6학년 학생 8명을 최종 연구 참여자로 선정하였다.

### 2. 자료 수집

이 연구에서 자료 수집을 위해 반구조화된 질문지에 따라 심층 면담을 실시하였다. 심층 면담을 위한 반 구조화된 면담지의 하위 질문의 범주는 자전축의 기울기, 태양의 남중고도, 지구의 공전과 자전, 태양과 지구의 위치였다. 연구자는 먼저 ‘태양과 지구의 운동과 관련하여 계절의 변화가 생기는 원인에 대해 설명하여 주십시오.’ 라고 질문을 하였으며, 참여자의 답변에 따라 자연스럽게 면담을 이끌어갔

다. 면담을 통해 수집한 자료는 모두 전사하여 기록하였으며, 연구의 보조 자료로 참여자가 생성한 몸짓을 분석하기 위해 심층 면담 과정을 동영상으로 기록하였다. 또한 자료의 다각화를 위해 관찰 및 현장 기록된 자료를 수집하였으며, 학생의 글과 그림 기록, 학생과 교사의 설문지를 최종 연구 참여자 선정을 위해 참고하였다.

### 3. 자료 분석

자료 분석을 위해 선행연구에 기반하여 개념 시뮬레이션 사례와 전략을 분석할 수 있는 분석틀을 개발하였으며, 참여자 8명의 프로토콜을 주 분석 자료로, 참여자의 동영상 자료에 나타난 몸짓과 관찰 기록 등을 보조 자료로 분석에 이용하였다.

#### 1) 개념 시뮬레이션 분석

이 연구에서 개념 시뮬레이션의 사례를 확인하기 위해 Trickett과 Trafton(2007, 2009)의 연구에서 사용한 개념 시뮬레이션의 분석틀을 수정, 보완하여 사용하였다. 수정 보완한 개념 시뮬레이션의 과정은 Table 1과 같이 초기표상 진술, 심상 시뮬레이션 실행, 시뮬레이션 결과 확인, 정렬 확인의 요소로 이루어졌으며, 과학적 추론 및 과학교육 전문가 4인에게 3차례에 걸쳐 내용타당도를 확인 받았다. 먼저 개념 시뮬레이션의 과정 중 초기표상 진술은 문제 상황의 시스템 또는 메커니즘과 관련된 표상을 처음으로 진술하는 것이다. 이 연구에서 초기표상 진술은 문제 상황의 인과적 메커니즘과 관련된 도식적, 유추적, 심상적 표상을 처음으로 진술하는 것으로 분석하였으며, 초기표상의 하위요소로 관련 개념을 예시화하여 진술하는 것과 관련 경험을 표상하는 것으로 구분하였다. 심상 시뮬레이션 실행은 가정(what if)에 의해 초기 표상(관련 개념의 예시화, 관련 경험 표상)을 조작 및 변환하는 것으로 분석하였으며, 시각적 표상을 조작 및 변환하는 공간 변환(spatial transformation)과 물리적인 성질(힘, 세기 등)을 조작 및 변환하는 작동 심상(motor imagery) 실행의 2가지 하위요소로 심상 시뮬레이션의 실행을 확인하였다. 시뮬레이션 결과 확인은 시뮬레이션에 대한 정신적 조작 또는 변환의 결과를 확인하는 것으로 시뮬레이션 실행을 통해 초기 표상의 변화된 결과를 확인하는 것이다. 정렬 확인은 시뮬레이션의 결과를 문제 상황에 맞추어 비교한 결과를 진술하는 것이다.

**Table 1.** The framework of conceptual simulation

conceptual simulation	Description	Example
초기표상 진술 (Statement of Initial Representation)	Refers to a new representation of a system or mechanism	자전축이 기울어져서 공전을 해서 그 태양 중심으로 각 위치마다 태양에 그 남중고도라고도 하고.. 태양의 고도인가..그 태양에 열을 받는 그 양이 좀 달라요.
심상 시물레이션 실행 (Running Imagistic Simulation)	Refers to transforming that representation spatially in a hypothetical manner	여름에요. 우리나라가 요만하다 치면요. 우리나라의 어떤 집 하나가 이만하다 치면요. 태양의 받는 여름에는 열을 받을 때
시물레이션 결과 확인 (Identifying Result of Simulation)	Refers to a result of the transformation (seeing what happens)	이 집 한곳에만 집중해서 많은 열을 한곳에만 집중해서 받는데
정렬 확인 (Identifying Alignment)	Make an estimation of “fit” between the two images(Statements which compared a built-up mental image with a problematic situation)	그래 가지고 겨울에는 여름보다 태양의 열을 많이 받지 못해서 계절의 변화가 그렇게 생기는 거예요.

이 연구에서는 이상과 같이 수정 보완한 분석틀의 과정 요소에 따라 계절의 변화 원인 설명 과정에서 나타나는 개념 시물레이션 사례를 분석하였다.

**2) 시물레이션 전략 분석**

개념 시물레이션 실행에서 나타는 시물레이션 전략을 분석하기 위해 Trickett과 Trafton(2002)의 공간 변환 분석틀의 공간 변환 요소(create, modify(add, delete), moving, rotation, comparison, animating, dimensional enhancement)를 바탕으로 개발하였다. 분석틀 개발 과정에서 과학적 추론 및 과학 교육 관련 학위를 소지하고 있는 과학교육 전문가 4인에게 3차례에 걸쳐 내용타당도를 확인 받아 수정 보완하였으며, 개발된 최종 시물레이션 전략 분석틀은 Table 2와 같다.

**3) 자료 분석의 검증**

수집된 자료는 수집이 끝난 후 곧바로 전사하였으며, 분석틀에 따라 분석하여 개념 시물레이션 사례를 추출하였다. 분석의 타당도를 확보하기 위해 동영상 자료 및 전사본을 수차례 반복하여 분석하였다. 이 과정에서 심상 시물레이션의 실행을 확인하기 위해 Stephens과 Clement(2010)가 제시한 심상 시물레이션에 대한 관찰 가능한 행동들을 확인하였다. 이에 동영상 자료와 전사본을 분석하여 Table 3과 같이 심상보고, 묘사적 몸짓, 역동적인 심상 보고의 관찰 행동들이 나타난 경우 심상 시물레이션 실행으로 코딩하였다.

또한 분석의 신뢰도를 확보하기 위해 동료 연구자 2인과 개별적으로 자료를 분석하여 비교하였으며, 분석 내용의 불일치는 논의를 통해 최종적으로 하나의 의견으로 조정할 때 까지 분석이 진행되었다.

**Table 2.** The framework of simulation strategy

Simulation strategy	Description
확대 (Zoom In)	일반적인 시각 작동을 통해 심상의 특징적인 부분을 확대하는 것
분할 (Partition)	심상(imagery)의 특징적인 부분을 구분하기 위해 영역을 나누는 것
차원 강화 (Dimensional Enhancement)	2D를 3D로 표상으로 바꾸어 생각하는 것
차원 감소 (Dimensional Reduction)	3D를 2D로 표상으로 바꾸어 생각하는 것
심상 비교 (Imagery Comparison)	심상의 상대적인 특징(크기, 모양, 색깔)을 비교하는 것
첨가 (Add)	특징적인 요소를 더함에 의해 심상을 수정하는 것
제거 (Remove)	특징적인 요소를 삭제함에 의해 심상을 수정하는 것
대체 (Replace)	심상의 특징이 잘 드러나도록 심상의 구성 요소를 바꾸어 생각하는 것
최소 최대화 (Extreme Case)	심상의 특징이 잘 드러나도록 변인(variable)을 최대화하거나 최소화하는 것

**Table 3.** The framework of imagery observation action

Imagery observation action	Description
심상 보고 (imagery report)	시각적 또는 감각적으로 대상에 대한 심상을 떠올리는 것을 보고하는 것(~을 그려보면, ~을 상상하면, ~을 떠올리면)
묘사적 몸짓 (Depictive gesture)	주제와 관련하여 대상의 역동적인 행동을 몸짓으로 묘사하는 것
역동적인 심상 보고 (dynamic imagery report)	상황 속에서 시간 경과에 따라 대상의 움직임, 변화 또는 상호작용을 설명하는 것

### Ⅲ. 연구 결과 및 논의

#### 1. 계절의 변화 원인 설명 과정에서 나타난 개념 시물레이션 사례

초등학생들의 계절의 변화 원인 설명 과정에서 나타난 개념 시물레이션 사례를 분석한 결과 과학 실험을 통해 학습한 지각적 경험을 이용하거나, 친숙한 대상을 이용하여 자발적 사고실험을 생성, 관련된 비유 상황의 지각적 경험을 이용하는 3가지 모습으로 나타났다.

##### 1) 과학 실험을 통해 학습한 지각적 경험을 이용

이 연구에서 개념 시물레이션 사례는 초기표상 진술, 심상 시물레이션 실행, 시물레이션 결과 확인, 정렬 확인의 과정을 통해 분석하였다. 과학 실험을 통해 학습한 지각적 경험을 이용한 사례에서 초기 표상 진술은 공전, 남중고도, 자전축의 기울기 등 관련 개념을 예시화하여 진술하는 것으로 나타났다. 또 심상 시물레이션 실행에서 관련 개념에 따라 초기 표상을 공간적으로 변환함으로써 시물레이션 결과를 확인하여 설명을 만들고 있었다. 예를 들어 참여자 A 사례1에서 심상 시물레이션 실행을 통해 자전축의 기울기를 변화시키고, 우리나라의 위치와 태양의 위치를 가정하여 심상적으로 결과를 확인하는 모습을 볼 수 있다.

##### <참여자 A 사례1>

<초기표상 진술> 자전축이 기울어져서 공전을 해서 그 태양 중심으로 각 위치마다 태양에 그 남중고도라고도 하고 태양의 고도인가..태양에 열을 받는 그 양이 좀 달라요.

<심상 시물레이션 실행> 자전축이.. 이렇게 기울어져 있어서..우리나라가 여기 있다고 치면요. 태

##### 양이 여기 있다고 했을 때

<시물레이션 결과 확인> 빛을 이만큼 받는데

<심상 시물레이션 실행> 겨울에는 이렇게 있으면

<시물레이션 결과 확인> 이만큼 받게 되요.

<정렬 확인> 그래 가지고 겨울에는 여름보다 태양의 열을 많이 받지 못해서 계절의 변화가 그렇게 생기는 거예요.

이러한 사례에서 참여자 A는 공전과 자전축의 기울기와 관련된 과학적 개념을 과학 실험에 학습한 모형 실험의 지각적 경험을 이용하여 심상 시물레이션을 실행하고 있었으며, 이를 통해 설명을 만들고 있었다. 이와 같은 사례는 참여자 B 사례와 참여자 D 사례에서도 확인할 수 있었다.

##### <참여자 B 사례1>

<심상 시물레이션 실행> 기울어 진채 공전하면 이렇게 지구가 있을 때 우리나라가 여기 있으면

<시물레이션 결과 확인> 그 여름에는 이렇게 해서 비추는데 양이 많은데 겨울에는 그 공전하는 게 다른데도 이동할거 아니에요,

<정렬 확인> 우리나라 그 위치가 그래서 그 태양 열의 차이가 조금 있을 거 같아요.

##### <참여자 D 사례>

<심상 시물레이션 실행> 태양이 여기 있고 지구가 여기 있으면 지구가 태양을 주위로 1년에 한 바퀴씩 돌게 되는데

<시물레이션 결과 확인> 그러면 봄에는 남중고도가 높지도 않고 낮지도 않은 중간쯤으로 봄과 가을은 날씨가 서늘하고

<심상 시물레이션 실행> 거기서 여기 쪽이 여름인데,

<시뮬레이션 결과 확인> 여름은 태양의 지표면과 이루는 남중고도가 높기 때문에 지표면은 그대로 한곳만 비춰서 온도가 높고

<심상 시뮬레이션 실행> 겨울은..

<시뮬레이션 결과 확인> 우리나라가 위쪽이고 남중고도가 낮게.. 해가 낮게 뜨기 때문에 열이 넓은 면적으로 퍼지기 때문에 상당히 덥기보다 추운 것 같아요.

<심상 시뮬레이션 실행> **자전축이 반대로 기울면요, 원래 이렇게 기울어졌으면**

<시뮬레이션 결과 확인> 지구가 이렇게 되는데 그러면 자전축이 기울어지면 지구도 이렇게 되잖아요. 그러면 태양이 이렇게, 이렇게 비추는데 그럼 우리나라는 빛을 많이 못 받아요.

이와 같이 참여자들이 과학 수업에서 모형 실험을 통해 개념을 설명할 수 있는 충분한 지각적 경험을 학습하였을 때, 이것이 학생들의 설명에서 심상 시뮬레이션 실행과 시뮬레이션 결과 확인의 과정을 통해 심상적으로 재연되고 있음을 확인할 수 있었다. 즉 계절의 변화 원인 수업에서 모형실험의 목적은 눈에 보이지 않는 거시적인 세계에 대한 움직임을 간접적으로 체험함으로써 학생들에게 필요한 지각적 경험을 제공하는 것이 되어야 하며, 이러한 지각적 경험이 체화된(embodied) 학생의 경우 설명과정에서 지각적 경험을 이용하여 심상을 생성하고 시뮬레이션 하여 설명하는 모습이 나타나고 있었다.

## 2) 친숙한 대상을 이용하여 자발적 사고실험을 생성

초등학생들의 설명과정에서 친숙한 대상에 비유하여 자발적으로 사고실험을 생성하는 사례를 확인할 수 있었다. 사고실험의 생성 사례는 과학적 개념을 설명하기 위해 친숙한 상황을 가져오고, 심상 시뮬레이션 실행을 통해 이를 공간적으로 조작하여 변화된 결과를 확인하는 모습으로 나타났다. 사고실험은 창의적 지식 생성에 중요한 역할을 하는 사고 전략으로 보고되고 있으며, 구성된 개념이나 설명을 평가하기 위해 고안된다(Clement, 2009). 예를 들어 참여자 A 사례2에서 앞서 과학 학습에서 얻은 지각적 경험을 통해 설명을 구성한 이후 이를 평가하기 위해 우리 나라의 어떤 집 하나를 가정하고, 또 집 한 채가 있고, 그 옆에 여러 개의 집이 있는 상황을 가정하는 모습을 심상 시뮬레이션을 실행하여 태양

의 남중고도에 따른 온도의 변화를 설명하고 있음을 볼 수 있다.

<참여자 A 사례2>

<심상 시뮬레이션 실행> **여름에요. 우리나라가 요만하다 치면요. 우리나라의 어떤 집 하나가 이만하다 치면요.**

<심상 시뮬레이션 실행> 태양의 받는 여름에는 열을 받을 때

<시뮬레이션 결과 확인> 이 집 한곳에만 집중해서 많은 열을 한곳에만 집중해서 받는데

<심상 시뮬레이션 실행> **겨울에는 집 한 채가 있고, 그 옆에 여러 개가 있으면**

<시뮬레이션 결과 확인> 한곳에 집중되지 않고 퍼져서 받게 되요.

<정렬 확인> 그래서 열을 골고루 받게 돼서 좀 적게 받아요. 그래서 겨울에 더 추운 거예요

이와 같이 초등학생의 경우에도 관련 개념을 설명하기 위해 간단한 사고실험 사례를 고안하여 설명하는 것을 확인하였으며, 이러한 사례를 통해 참여자 A가 계절의 변화 원인에 대한 메커니즘을 완전히 이해한 상태에서 친숙한 대상을 빌려 메커니즘을 설명하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 전략은 친숙한 대상에 대한 공간변환 실행을 통해 개념과 경험을 결합하여 새로운 상황을 구성하는 변형적 구성 전략이라는 점에서 선행연구의 결과와 일치한다. 이와 같은 사례를 Nersessian과 Chandrasekharan (2009)은 하이브리드 유추(hybrid analogy)라고 보고하였다.

## 3) 관련된 비유 사례의 지각적 경험을 이용

마지막으로 관련된 비유 사례의 지각적 경험을 이용하는 사례가 확인되었다. 관련된 비유 사례의 지각적 경험을 이용하는 것은 계절의 변화 원인 설명을 위해 이미 참여자가 가지고 있는 지각적 경험을 이용하는 것이다. 예를 들어 참여자 B 사례2에서 역시 태양의 고도에 따른 에너지 양을 설명하기 위해 돋보기로 한곳을 모아서 보았던 지각적 경험을 떠올리고 결과를 확인하여 설명하고 있었다.

<참여자 B 사례2>

<초기 표상 진술> 태양이 고도가 달라서 지표면

에 닿는 에너지양이 다르니까 겨울에는 춥고, 여름에는 에너지양이 많아서 더운 거 같습니다.

<심상 시물레이션 실행> 그 돋보기로 보면

<시물레이션 결과 확인> 태양열이 한곳으로 모여서 불이 붙는 거잖아요.

<정렬 확인> 그런데 겨울에는 남중고도가 좀 낮아서 한 번에 이만큼 넓은 곳에 비추다 보니까 에너지가 분산돼 가지고 좀 춥고 여름에는 한곳으로 에너지가 좁혀서 비추니까 여름에는 더운 거 같습니다.

이와 같은 사례에서 심상 시물레이션의 실행은 공간적으로 표상을 변환(spatial transformation)하는 모습은 확인되지 않으며, 지각적 경험에 대한 작동심상(motor imagery)을 실행하고, 그 결과를 확인하는 것으로 심상 시물레이션이 실행되는 것을 확인할 수 있다. 이처럼 참여자 B가 생성한 비유 사례는 지각적 경험을 이용함으로써 설명에 대한 확신을 높여 주지만, 태양의 남중고도에 따른 온도변화의 메커니즘을 설명하기에는 제한된다. 이는 사고실험과 비유적 추론의 차이점으로 Trickett과 Trafton (2007)은 사고실험과 비유적 추론의 차이점에 대해 비유적 추론이 기억의 회상에 기반을 둔 전략인 반면 사고실험은 최초의 표상이 기억에 기반을 둘지라도 미래 상태를 생성하기 위해 유사한 상황을 참조하여 변형한다고 하였다. 즉 사고실험의 생성은 개념에 대한 이해를 바탕으로 비유 상황을 재구성하여 상상의 실험을 고안하는 보다 높은 수준의 사고 전략이며(Ko & Yang, 2013), 이 연구에서 초등학생인 참여자 A가 과학학습에서 얻은 지각적 경험을 통해 설명을 생성하고, 이를 확고히 하기 위해 간단한 사고실험을 생성하는 것을 확인하였다. 이를 통해 자발적 사고실험의 생성이 전문가나 성인에게 나타나는 특징이라기보다 메커니즘을 충분히 이해하고 있는 초등학생에게도 사용될 수 있음을 알 수 있었다.

## 2. 개념 시물레이션 사례에서 확인된 실수

개념 시물레이션은 완벽하고 논리적인 추론 과정이라고 하기보다, 관련 개념, 지각적 경험, 직관을 사용한 일상적이고 비형식적인 추론 과정이다. 따라서 개념 시물레이션은 학생들이 가지고 있는 개념이나 신념, 경험, 직관 등을 있는 그대로 드러냄으로써 학생들의 생각을 이해하는 것을 도울 수 있으나,

이 과정에서 추론 과정의 실수가 나타날 수 있다. 개념 시물레이션의 사례에서 나타날 수 있는 실수 사례를 확인하기 위해 Reiner와 Burko(2003)가 사고실험에서 나타날 수 있는 실수로 제시한 불완전성(incompleteness), 부적절성(irrelevancy), 직관(intuition)의 요인에 따라 분석하였다. Reiner와 Burko (2003)는 사고실험 과정에서 나타날 수 있는 실수 사례들을 분석하였는데, 사고실험의 실수는 1단계(이론이 사용된 것과 같은 일반적 가정)와 2단계(상상된 세계를 고안)에서 확인된다고 보고하였으며, 과학자들조차 비현실적 가정 또는 조건을 제안할 때 실수를 만들 수 있다고 하였다. 이에 이 연구 결과에서 불완전성, 부적절성, 직관 요인에 따라 초기표상 진술, 심상 시물레이션 실행 과정에서 나타난 실수를 분석하였다.

### 1) 초기 표상 진술에서 확인된 실수

초기 표상 진술에서 확인된 실수는 불완전성, 직관 요인과 관련되었다. 불완전성에 의한 실수는 이론, 개념, 모델의 가정에 의해 불완전한 초기표상을 가지고 있는 경우였으며, 이러한 경우 이론이나 개념에 기반하여 초기 표상을 진술하기 보다 직관에 의해 초기표상을 진술하는 모습을 나타냈다. 참여자 F는 지구의 자전축의 기울기, 남중고도와 관련된 과학적 개념보다는 태양에서 지구까지의 거리에 따라 계절이 변화한다는 직관에 의존한 초기 표상을 진술하였다. 이와 같이 초기 표상 진술이 불완전한 경우 효과적인 심상 시물레이션 실행이 이루어졌다고 하더라도 과학적 개념에서 벗어난 결과를 확인하고 있는 모습을 알 수 있다.

#### <초기 표상 진술에서 확인된 실수 사례 - 참여자 F 사례>

<초기 표상 진술> 계절 봄, 여름, 가을, 겨울이 생기는 이유는 자전축이 기울어진 상태에서 지구가 시계 반대방향으로 돌면서 거리도 조금 시작 지점이 달라져서 거기서 지구가 돌면서 봄, 여름 가을 겨울이 생겨요.

<심상 시물레이션 실행> 제 머리가 태양이고 제 주먹이 지구라고 생각한다면 여기 봄처럼 시작하면 봄은 그래도 겨울보다는 가깝고, 여름보다는 먼 상태에서 이정도 위치에 있다면

<시물레이션 결과 확인> 여름은 계속 돌아가면서

낮과 밤이 생기면서, 계속 시간이 지나면서 여름에는 가까워지고 가을에는 조금 봄처럼 같은 거리에 있고, 겨울에는 그래도 봄, 가을 보다는 좀 멀리 있어서 추운 것 같아요.

## 2) 심상 시뮬레이션 실행 과정에서 확인된 실수

심상 시뮬레이션 실행 과정에서 확인된 실수는 부적절한 상황을 고안하는 경우였다. 즉 심상 시뮬레이션 실행 과정에서 과학적으로 맞지 않은 상황을 고안함으로써 나타나는 실수였다. 참여자 G 사례의 심상 시뮬레이션 실행에서 여름과 겨울의 자전축을 일정하게 놓지 않고, 반대 방향으로 설정함으로써 지구의 위치를 적도 아래쪽으로 놓고 결과를 확인하는 모습을 알 수 있다. 이렇듯 자신이 수업 시간에 학습한 결과에 설명을 맞추기 위해 심상 시뮬레이션 실행 과정에 잘못된 실험 설계를 하는 모습이 나타났다.

### <심상 시뮬레이션 실행 과정에서 확인된 실수- 참여자 G 사례>

<초기 표상 진술> 계절의 변화가 생기는 원인은 지구가 공전과 자전을 하면 태양주위를 돌기 때문에 온도가 변하기 때문에 계절이 생깁니다.

<심상 시뮬레이션 실행> 태양이 가운데 있을 때, 이쪽이 여름인데 이쪽이 여름이면..

<시뮬레이션 결과 확인> 우리나라가 적도는 지구의 반을 기준으로 한 건데요, 적도 위에 있어서 태양의 빛이 쬐 나오기 때문에 우리나라의 태양에 빛이 더 많이 오고.. 또 높게 보여요.

<심상 시뮬레이션 실행> 그리고 겨울에는 이쪽이 태양의 중심이면 여기가(적도 아래쪽에) 지구가 있어요.

<시뮬레이션 결과 확인> 우리 지구의 적도 아래에 우리나라가 있기 때문에 태양의 빛이 적어서 춥고 남중고도가 낮아요.

이와 같이 심상 시뮬레이션 과정을 분석하여 참여자가 초기표상 진술, 심상 시뮬레이션 실행 과정에서 실수를 나타내고 있음을 확인하였다. 참여자 F 사례에서는 불완전한 정신모델이 초기표상 진술에서 드러났으며, 이후 시뮬레이션 과정 역시 불완전한 정신모델을 드러내고 있다. 반면, 참여자 G 사례에서는 초기표상 진술에서 정신모델이 구체적으로

드러나지 않으며, 심상 시뮬레이션 실행 과정에서 구체적으로 어떠한 부분에서 잘못된 모델을 설명하게 되었는지를 확인할 수 있다. 즉 심상 시뮬레이션 실행을 통해 개념을 사용하게 함으로써 어떠한 개념이, 어디에서 잘 못되었는지를 알 수 있다. 또 이러한 분석을 통해 교사는 학생들에게 효과적인 피드백이나 스캐폴딩을 제공해 주어야 함을 알 수 있다. 예를 들어 참여자 F 사례의 경우 참여자가 가진 정신모델이 과학적 개념과 다른 경우로 적절한 지적 경험들 통해 과학적 모델을 경험시켜 주어야 한다. 반면 참여자 G 사례의 경우 초기표상이 불완전하고, 시뮬레이션 과정에서 일부 개념의 연결이 잘못되어 있으므로 실행과정에서 틀린 부분을 알려주어 바로잡아 줄 수 있다. 즉 계절의 변화 원인에 대한 설명은 태양의 남중고도, 자전축의 기울기, 공전, 자전 등의 여러 개념을 요구하며, 교사는 학생의 설명 과정에서 전체적 또는 부분적인 실수를 점검하며, 이를 바로잡을 수 있도록 도와주어야 한다.

## 3. 설명을 확고히 하기 위해 사용된 시뮬레이션 전략

마지막으로 계절의 변화 원인을 설명하는 과정에서 효과적인 시뮬레이션 전략을 사용하여 설명을 수정 및 개선하고, 정교화하는 모습을 확인하였다. 참여자 H 사례에서 초기의 정신모델은 다음과 같았다. 여름이 낮의 길이가 길기 때문에 태양 에너지를 많이 받아 계절의 변화가 생긴다는 초기표상1을 진술하였으나, 개념 시뮬레이션 과정에서 낮과 밤의 길이와 관련된 설명에 남중고도의 개념을 적용하여 정교화된 초기표상 진술2를 통해 보다 정교화된 정신 모델로 수정하는 모습을 확인할 수 있었다.

### <참여자 H 사례1의 초기의 정신모델>

<초기 표상 진술1> 낮과 밤이 다 있긴 한데 대체적으로 여름에는 지금도 여름이니까 살펴보면, 밤 거의 9시에 시작하잖아요, 대부분. 그러니까 낮의 길이가 더 많으니까 여름은 태양의 에너지를 더 많이 받잖아요. 대체적으로 간략하게 설명해서 낮이 제일 많이 있는 낮하고 밤의 길이 변화를 설명해서 그런 거예요.

### <참여자 H 사례2에서 정교화된 정신모델>

<초기 표상 진술2> 여름에는.. 태양의 고도가 겨

울에 비해서 높은데 그것도 기온도 높아서 그런 거 같아요. 그런데 그것의 원인에는 태양.. 지구로서 태양의 여름에 비추는 양도 많고 지구로서 받는 태양 에너지를 일정 면적에 도달하는 양이 더 많기 때문에 낮이 더 길면서 기온도 높은 거고 겨울에서는 태양 에너지를 많이 받지 못하기 때문에 지구의 일정 면적을 비교하면 거기에서 태양의 고도도 낮기 때문에.. 밤의 길이가 더 길며 기온도 낮게 되는 거예요.

참여자 H는 초기표상 진술1에 대한 심상 시물레이션 실행 과정에서 관련 개념을 사용하게 하여 암묵적 지식을 활성화함으로써 계절의 변화와 관련하여 처음에 떠오르지 못하였던 남중고도의 개념을 떠올릴 수 있었고, 이를 명시적이고 구체적인 표상으로 드러나도록 하였다. 이는 심상 시물레이션의 실행이 지식을 사용하게 함으로써 암묵적 지식을 활성화한다고 보고한 연구 결과와 일치하는 내용이다(Clement, 2003, 2008).

이와 같이 계절의 변화 원인에 대해 정교화 된 정신모델을 확고히 하기 위해 사용된 시물레이션 전략을 구체적으로 살펴보면 다음과 같다. 참여자 H 사례에서 참여자가 사용한 전략은 제거 전략이었으며, 시물레이션 전략의 사용은 참여자가 자전축 기울기의 원인에 따른 설명을 확신하는데 중요한 역할을 하였다. 참여자 H는 남중고도 개념과 관련된 설명을 확고히 하기 위해 과학수업을 통해 학습한 지각적 경험을 심상 시물레이션을 위해 떠올렸으며, 자전축의 기울기를 제거하는 전략을 통해 설명을 확고히 하고 있다. 이에 대한 구체적인 사례는 다음 프로토콜에서 확인할 수 있다.

#### <참여자 H 사례3-제거 전략의 사용>

<심상 시물레이션 실행> (자전축이) 안 기울어졌다면

<시물레이션 결과 확인> 반드시 태양 빛이 받고 있는 것이기 때문에 낮이든 밤이든 항상 덥고 우리나라에서만 완전 덥기 때문에 다른 나라에서는 항상 춥거나 날씨가 쌀쌀한 온도가 계속 반복할 거예요.

또한 앞서 참여자 A의 자발적 사고실험 생성 사례를 분석하여 보면, 남중고도에 따른 온도의 변화

설명하기 위해 햇빛을 받는 면적을 집으로 대체하여 설명을 확고히 하고 있는 것을 알 수 있다.

#### <참여자 A 사례2-대체 전략의 사용>

<심상 시물레이션 실행> 여름에요. 우리나라가 요만하다 치면요. 우리나라의 어떤 집 하나가 이만하다 치면요.

<심상 시물레이션 실행> 태양의 받는 여름에는 열을 받을 때

<시물레이션 결과 확인> 이 집 한곳에만 집중해서 많은 열을 한곳에만 집중해서 받는데

즉 시물레이션 전략을 통해 공간적으로 심상을 변환하고, 이는 지구와 태양의 공간적인 움직임에 대한 심상의 효과를 강화하여 계절의 변화 원인 설명을 확고히 하였다.

## V. 결론 및 제언

### 1. 결론

이 연구에서는 초등학생들의 계절의 변화 원인 설명 과정에서 나타난 개념 시물레이션 사례를 분석함으로써 다음과 같은 결과를 확인할 수 있었다.

첫째, 계절의 변화 원인 설명 과정에서 초등학생들은 주로 과학수업에서 모형 실험을 통해 학습한 지각적 경험을 이용하여 설명을 만들고 있었으며, 친숙한 대상을 이용하여 사고실험 사례를 고안하거나, 관련된 비유 사례의 지각적 경험을 이용하여 설명을 확고히 하는 것을 돕고 있었다. 이를 통해 모형 실험을 통해 충분한 지각적 경험을 갖는 것이 계절의 변화 원인의 메커니즘을 이해하는 데 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있었으며, 메커니즘을 충분히 이해한 학생의 경우 관련 경험의 사례를 공간적으로 변환하여 메커니즘을 확인하고 있음을 알 수 있었다. 반면 계절의 변화 원인에 대해 언어적 설명으로 기억을 저장하고 있는 학생들의 경우 학습된 지각적 경험이 부족하여 개념 시물레이션을 통해 설명을 구성하는데 어려움을 겪었다.

둘째, 개념 시물레이션의 실수 사례를 분석함으로써 계절의 변화 원인 설명 과정에서 나타날 수 있는 실수를 확인하였다. 개념 시물레이션 사례의 실수는 초기표상의 진술, 심상 시물레이션의 실행 과

정에서 나타났으며, 참여자들의 초기표상 진술이 불완전하거나, 심상 시뮬레이션 실행에서 부적절한 상황을 떠올린 경우였다. 따라서 교사들은 학생들의 개념 시뮬레이션 과정에서 실수를 확인하고, 적절한 피드백과 스캐폴딩을 제공해 주어야 할 것이다.

마지막으로 계절의 변화 원인 설명 과정에서 정교화 된 정신 모델을 확고히 하기 위해 사용된 시뮬레이션 전략을 분석함으로써 계절의 변화 원인 설명에서 교사가 사용할 수 있는 전략에 대한 시사점을 확인하였다. 참여자 H는 최초 낮과 밤의 길이에 따라 계절의 변화 원인을 설명하였으나 개념 시뮬레이션 과정에서 남중고도를 고려한 정교화 된 정신 모델을 생성하였으며, 이를 확고히 하기 위해 제거 전략을 사용하는 것을 확인하였다. 또 심상의 요소를 친숙한 대상으로 대체하여 심상의 효과를 강화하는 모습을 확인하였다. 이처럼 시뮬레이션 전략의 사용은 설명을 확고히 하는 것을 돕고 있었다. 이와 같은 결과는 계절의 변화 원인 수업에서 효과적인 시뮬레이션 전략을 사용하여 설명하는 것이 학생들을 이해시키는 것을 도울 수 있음을 시사한다.

## 2. 제언

이 연구를 통해 다음과 같은 교육적 함의를 시사하고자 한다.

첫째, 계절의 변화 원인에 대한 수업은 태양과 지구의 공전과 자전, 자전축의 기울기, 남중고도에 대한 지각적 경험을 충분히 제공할 수 있도록 이루어져야 할 것이다. 천체의 운동은 학생들이 직접 경험하기에 불가능한 거시적인 세계이기 때문에 모형을 통해 수업을 하는 것이 불가피하다. 하지만 그렇다 하더라도 교사가 수업 준비나 실행 과정에서 번거로움을 피하기 위해 대표 실험을 통해 보여주거나, 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램을 통해 시각적으로 보여주기만 하는 것은 바람직하지 않다. 지구의 공전과 자전, 자전축의 기울기, 남중고도의 변화와 관련된 개념을 학생들이 식물 모형을 통해 여러 번 반복적으로 조작하고 만져볼 수 있도록 하여 지각적 경험을 충분히 제공하여야 할 것이다.

둘째, 교사는 개념 시뮬레이션 사례를 분석함으로써 학생들이 어떠한 부분에서 계절의 변화 원인에 대한 이해에 어려움을 겪고 있는지 확인할 수 있다. 즉, 학생들이 초기표상이 불완전한 것인지, 심상 시뮬레이션 실행이 잘못되었는지를 파악함으로써

적절한 피드백과 스캐폴딩을 제공하는데 도움을 줄 수 있다.

마지막으로 계절의 변화 원인 설명을 위한 효과적인 시뮬레이션 전략이 무엇인지 연구되고 사용되어야 할 것이다. 이 연구에서는 초등학생들의 수준에서 자발적으로 사용한 제거, 대체 전략이 심상의 효과를 강화하여 이해에 도울 수 있음을 확인하였으며, 이외에도 심상의 효과를 강화하기 위해 전문적인 과학교사들이 어떠한 전략을 사용하고 있는지 탐색되어야 할 것이다.

## VI. 요약

이 연구의 목적은 계절의 변화 원인을 설명하는 과정에서 초등학생들의 개념 시뮬레이션을 분석함으로써 학생들이 어떻게 계절의 변화 원인에 대한 설명을 어떻게 생성하고 있는지를 알아보고, 계절의 변화와 관련된 교육에 시사점을 주는 데 있다. 이를 위해 문헌 연구를 기반으로 개념 시뮬레이션 과정 및 전략 분석틀을 개발하였으며, 과학교육 전문가 4인의 내용타당도를 확인 받았다. 연구의 결과는 다음과 같다. 첫째, 계절의 변화 원인 설명 과정에서 초등학생들은 주로 과학수업에서 모형 실험을 통해 학습한 지각적 경험을 이용하여 설명을 만들고 있었으며, 친숙한 대상을 이용하여 사고실험 사례를 고안하거나, 친숙한 지각적 경험을 유추하여 설명을 확고히 하는 것을 돕고 있었다. 둘째, 개념 시뮬레이션 사례의 실수는 초기표상의 진술, 심상 시뮬레이션의 실행 과정에서 나타났으며, 참여자들의 초기표상 진술이 불완전하거나, 심상 시뮬레이션 실행에서 부적절한 상황을 떠올린 경우였다. 셋째, 초등학생들의 개념 시뮬레이션 과정에서 남중고도의 개념과 관련된 정신모형을 확고히 하기 위해 제거, 대체의 시뮬레이션 전략을 사용하는 것을 확인하였다.

## 참고 문헌

- Ball, L. J., & Christensen, B. T. (2009). Analogical reasoning and mental simulation in design: Two strategies linked to uncertainty resolution. *Design Studies*, 30(2), 169-186.
- Berland, L., & Reiser, B. (2009). Making sense of argumentation and explanation. *Science Education*, 93(1), 26-55.

- Chae, Dong-hyun. (2011). The investigation of dix grade students' preconceptions about the cause of seasonal change. *Journal of Korean Elementary Science Education*, 30(2), 204-212.
- Clement, J. (2000). Model-based learning as a key research area of science education. *International Journal of Science Education*, 22(9), 1041-1053.
- Clement, J. (2003). Imagistic simulation in scientific model construction. *Proceedings of the Twenty-Fifth Annual Conference of the Cognitive Science Society*, 25. Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Clement, J. (2008). Creative model construction in scientists and students: The role of imagery, analogy, and mental simulation. Dordrecht: Springer.
- Clement, J. (2009). The role of imagistic simulation in scientific thought experiments. *Topics in Cognitive Science*, 1(4), 686-710.
- Galili, I. (2009). Thought Experiments: Determining Their Meaning. *science & Education*, 18(1), 1-23.
- Gilbert, J., & Reiner, M. (2000). Thought experiments in science education: potential and current realization. *International Journal of Science Education*, 22(3), 265-283.
- 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.
- Griffith, T. W., Nersessian, N. J., & Goel, A. (2000). Function-follows-form transformations in scientific problem solving. In *Proceedings of the Cognitive Science Society 22*, 196-201. Mahwah, N. J. : Lawrence Erlbaum.
- Kali, Y., Orion, N., & Mazar, E. (1997). Software for assisting high school students in the spatial perception of geological structures, *Journal of Geoscience Education*, 45(1), 10-21.
- Kastens, K., & Rivet, A. (2008). Multiple modes of inquiry in earth science. *The Science Teacher*, 75(1), 26 - 31.
- Katz, R., Ragnarsson, R., & Bodenschatz, E. (2005). Tectonic microplates in a wax model of sea-floor spreading. *New Journal of Physics*, 7, (37), doi:10.1088/1367-2630/7/1/037
- Khan, S. (2008). What if scenarios for testing student models in chemistry. In J. Clement & M. A. Rea-Ramirez (Eds.), *Model based learning and instruction in science* (Ch. 8, pp. 139-150). Dordrecht: Springer.
- Kim, Soon-sick. (2012). The study of elementary preservice teacher's classes on seasonal variation. *Journal of the Korean society of earth science education*, 5(3), 245-255.
- Ko, Min-seok., & Yang, Il-ho. (2013). Analysis on the relationship between the construct level of analogical reasoning and the construction of explanatory model observed in small group discussions on scientific problem solving. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 33(2), 522-537.
- Lightman, A. & Sadler, P. M. (1993) Teacher Predictions versus Actual Student Gains. *The Physics Teacher*, 31(3), 162-167.
- Libarkin, J. C., Beilfus, M., & Kurdziel, J. P. (2003). Research methodologies in science education: Mental models and cognition in education. *Journal of geoscience education*, 51(1), 121-126.
- Moulton, S. T., & Kosslyn, S. M. (2009). Imagining predictions: mental imagery as mental emulation. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 364(1521), 1273-1280.
- Nersessian, N. J. (2008). Mental modeling in conceptual change. In S. Vosniadou (Ed.), *Intentional handbook of conceptual change* (pp. 391-416). New York: Routledge.
- Nersessian, N. J. (2009). How do engineering scientists think? model-based simulation in biomedical engineering research laboratories. *Topics in Cognitive Science*, 1(1), 1-28.
- Nersessian, N. J., & Chandrasekharan, S. (2009). Hybrid analogies in conceptual innovation in science. *Cognitive Systems Research*, 10(3), 178-188.
- Orion, N., BenChaim, D., & Kali, Y. (1997). Relationship between earth-science education and spatial visualization, *Journal of Geoscience Education*, 45, 129-132.
- Reiner, M., & Burko, L. (2003). On the limitations of thought experiments in physics and the consequences for physics education. *Science and Education*, 12(4), 385 - 358.
- Schwarz, C. V., Reiser, B. J., Davis, E. A., Kenyon, L., Achér, 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.
- Stephens, L., & Clement, J. (2010) Documenting the use of expert scientific reasoning process by high school physics students. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 6(2), URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevSTPER.6.020122>.
- Trafton, J. G., Trickett, S. B., & Mintz, F. (2005). Connecting internal and external representations: Spatial transformations of scientific visualizations. *Foundations of Science*, 10(1), 89 - 106.
- Trickett, S., & Trafton, J. G. (2002). The instantiation and use of conceptual simulations in evaluating hypotheses: movies in the mind in scientific reasoning. *Peoceedings of the 24th Annual Conference of the Cognitive Science Society*, Mahwah, NJ.
- Trickett, S. B., & Trafton, J. G. (2007). "What if...": The use of conceptual simulations in scientific reasoning, *Cognitive Science*, 31(5), 843-875.
- Trickett, S. B., Trafton, J. G., & Schunn, C. D. (2009). How do scientists respond to anomalies? different strategies used in basic and applied science. *Topics in Cognitive Science*, 1(4), 711-729.
- Zeilik, M., & Bisard, W. J. 2000, Conceptual Change in Introductory-Level Astronomy Courses, *Journal of College Science Teaching*, 29(4), 229-232.p