

과학 학습에서 메커니즘 추론을 위한 뇌과학적 접근 가능성 탐색

신정윤*
대전두리초등학교

A Brain Scientific Approach to Mechanistic Reasoning in Science Learning

Jung-Yun Shin*
Daejeon Duri Elementary School

<ABSTRACT>

Mechanistic reasoning can explain how a phenomenon comes about or how a certain process works. The purpose of this study was to summarize the meaning and character of mechanistic reasoning in the science education. Also this study reviewed the brain scientific study about scientific reasoning and explored potential of brain scientific approach to mechanistic reasoning.

Key words : Mechanistic reasoning, Reasoning, Brain scientific approach

* 교신저자 : 신정윤, 55naru@naver.com

Received March 28, 2016; Accepted April 10, 2016; Published April 30, 2016

2016. Institute of Brain based Education, Korea National University of Education

I. 서론

과학은 자연 현상을 관찰하여 사실적으로 서술하고 추론을 통해 인과적으로 설명하는 과정이다. 특히 추론은 자연 현상의 이면에 존재하는 인과 메커니즘을 이해하고 설명하는 과정으로서 과학적 탐구의 중요한 부분이며(Russ et al., 2008), 추론의 결과 얻어진 설명체계는 과학적 탐구의 중요한 목적이 되고 있다. 현상에 대한 과학적 설명은 보통 인과적 추론(Cheng & Novick, 1992; Gopnik et al., 2001)이나 귀추적 추론(Kown et al., 2000; Yang et al., 2006; Lawson, 1995)을 사용한다. 그러나 자연은 여러 가지 요인들과 요인들 간의 관계가 복잡하게 얽히며 현상을 만들어 내고 있어(Glymour, 2003), 현상을 하나의 원인적 설명자로 설명하기 어려운 경우가 많다. 간명하고 단선적인 인과적 추론이나 귀추적 추론으로 자연 현상을 자세히 설명하기는 쉽지 않다. 특히 과학의 여러 분야 중에서 생물학 분야는 인과적 추론이나 귀추적 추론으로 현상에 관련된 메커니즘을 충분히 설명하기 어렵다(Bechtel & Richardson, 1993).

자연 현상에 대한 인과적 설명 과정에서 메커니즘적 접근은 인과적 추론이나 귀추적 추론의 한계를 보완할 수 있다(Ahn & Kalish, 2000). 특히 생물학에서는 현상을 설명할 때 법칙으로 보다는 메커니즘 작동으로 설명하는 경향이 있다(Machamer et al., 2000). 현상에 대한 복잡한 인과 메커니즘을 밝히는 추론인 메커니즘 추론은 메커니즘의 규칙적 변화를 나타나게 하는 실체와 활동을 확인해 나가는 과정이다(Russ et al., 2008). 메커니즘 추론은 메커니즘의 구성요소를 확인하고 구조를 설명함으로써 물리적 시스템을 설명하며, 이를 바탕으로 새로운 현상을 예상하기도 한다. 이 때문에 메커니즘 추론은 과학기술의 여러 분야에서 지식을 구성하는 핵심 과정이다(Machamer et al., 2000; Nersessian, 2008). 과학학습에서 메커니즘 추론의 중요성이 부각됨에 따라 최근 자연 현상을 단순 인과적으로가 아니라 메커니즘을 이해하려는 시도와 함께, 메커니즘 추론을 하는 과학적 탐구활동이나 메커니즘 추론을 활용한 교수 전략에 대한 연구가 차츰 진행되고 있다.

한편, 과학적 추론은 수준 높은 인지 활동으로 뇌의 전두엽연합령의 활성화과정과 억제과정에 의해 영향을 받으며(Hur et al., 1998), 두뇌활성 네트워크에 대한 연구를 통해 개인의 결론도출 능력 수준이 예측되기도 한다(Kown et al., 2010). 인과적 추론이나 귀추적 추론보다 다소 더 복잡한 메커니즘 추론에 대한 두뇌 활성 정도와 추론 능력 수준의 예측도 가능할 수 있다.

따라서 이 연구에서는 현상의 설명과정에서 도입하는 메커니즘과 메커니즘 추론의 의미와 성격을 정리하고, 과학적 추론과 관련된 뇌과학 연구 결과를 정리하여 메커니즘 추론 능력에 대한 뇌과학적 접근의 연구 주제를 탐색하고자 한다.

II. 본론

1. 메커니즘의 의미와 성격

가. 메커니즘의 정의

메커니즘은 전체를 구성하는 각 구성 요소들의 작동과 구성 요소들끼리의 조직으로 인하여 어떤 기능을 수행하게 되는 구조를 말한다(Bechtel & Abrahamsen, 2005). 그러나 메커니즘의 의미에 대하여 학자들간의 견해와 강조점은 다소 다른데, 실체와 활동, 상호작용, 인과적 과정 등의 관점에 따라 다양하게 정의되고 있다.

‘실체와 활동’의 관점에서는 메커니즘을 ‘시작 조건에서 종료 조건까지 생산적인 변화를 가져오는 실체와 활동의 조직(Machamer et al., 2000)’으로 정의하며, 실체의 활동을 강조하는 ‘활동’의 관점에서는 메커니즘을 ‘초기 조건에서 종결 조건까지 규칙적인 변화를 유발하도록 조직된 실체들과 그 활동(Machamer, 2000)’으로 정의한다. ‘상호작용’ 관점에서는 ‘여러 부분간의 상호작용에 의해 만들어지는 복잡한 시스템(Glennan, 2000)’, ‘작동하거나 상호작용하는 부분들의 시스템(Thagard, 2000)’, ‘직접적인 부분들의 상호작용에 의해 그 행동이 유발되는 복잡한 체계(Glennan, 1996)’로 정의하고 있다. ‘인과적 과정’의 관점에서는 ‘결과를 가져오는 원인에 의한 과정을

설명하는 것(Koslowski, 1996)으로 정의한다. 이와 같은 여러 메커니즘 정의에서 중요한 요소는 현상, 현상을 구성하는 실체, 실체들이 나타내는 규칙적인 활동, 실체와 활동간의 조직과 상호작용이다(Bechtel & Richardson, 1993; Darden, 2002).

나. 메커니즘의 구성 요소

메커니즘은 실체와 활동의 조직으로 구성된다(Gustone, 2015). 실체는 행동하거나 활동에 참여하는 사물(thing)로(Gustone, 2015), 메커니즘의 규칙적 변화를 이끄는 인과적인 각각의 부분이다. 예를 들면, 생물학에서는 세포, 기관, 조직 등이 실체가 되며, 물리학에서는 전자, 물체 등이 실체가 된다(Russ et al., 2008), 천문학에서는 별, 백색왜성, 블랙홀, 핵, 태양풍 등이 실체가 될 수 있다(Illari & Williamson, 2012).

활동은 현상을 일으키는 작동 방법(Gustone, 2015)을 말한다. 즉 실체들 사이에서 일어나는 규칙적인 변화와 다양한 상호작용이 활동이다. 예를 들면, 물리학적 힘의 메커니즘에서는 실체인 두 물체들 사이에서 나타나는 변화인 가속도 운동, 두 물체 사이의 상호작용인 중력이 미치는 것이 활동이다(Russ et al., 2008). 천문학에서는 두 천체 사이의 충돌, 태양으로부터 에너지의 방출, 내부 압력에 의한 항성의 붕괴 등이 활동의 예이다(Illari & Williamson, 2012).

다. 메커니즘의 특징

메커니즘은 실체와 활동의 시간적·공간적 구성에 의존하여 발생한다(Craver, 2002). 생산적이고 연속적인 메커니즘이 일어나기 위해서는 실체의 적절한 위치, 구조, 방향과 활동의 시간적 순서, 비율, 기간이 적절해야 한다(Russ et al., 2008). 연결되어야 하는 두 실체가 공간적으로 멀리 있거나 잘못 배열되었을 경우, 활동이 발생하는데 너무 오랜 시간이 걸리면 메커니즘이 일어날 수 없다(Craver, 2001).

메커니즘은 수직적 위계 구조를 가진다. 레벨 L에서의 활동은 낮은 단계인 L-1에서의 특정 활동과 실체로 구성되어 있으며, 동시에 높은 단계인 L+1의 부분이 된다(van Mil, Boerwinkel & Waarlo, 2013).

예를 들어, Na^+ 채널의 활성화는 탈분극 메커니즘의 구성요소가 되고, 탈분극은 화학적 신경전달물질의 메커니즘 구성요소가 되고, 이는 더 높은 단계의 메커니즘인 중추신경계의 구성요소가 된다(Machamer et al., 2000).

2. 메커니즘 추론

가. 메커니즘의 추론의 의미

메커니즘 추론은 관찰된 현상에 대한 복잡한 인과 메커니즘을 밝히기 위한 추론이다(Russ et al., 2008b). 현상을 관찰하여 서술한 정보로부터 메커니즘의 규칙적 변화를 나타나게 하는 실체와 활동을 확인해나가는 과정이다. 인과적 추론은 결과를 일어나게 한 원인이 무엇인지 밝혀내는데 초점을 두며, 귀추적 추론은 현상을 설명할 수 있는 가설을 생성하는 과정에 대한 추론이다. 반면에 메커니즘 추론은 원인과 결과를 연결시켜주는 복잡한 인과 과정을 밝히는 것을 강조한다. 메커니즘 추론은 인과적이고(Koslowski, 1996; Schauble, 1996), 경험에 기반하고 있으며(Keil et al., 1999), 구조를 설명하는데 용이하기 때문에(Chinn & Malhotra, 2002), 인과 메커니즘을 밝히고 물질세계를 이해하기에 적합하다(Russ et al., 2008b).

나. 메커니즘의 추론 분석틀

학생들의 담화 속에서 발생하는 메커니즘 추론을 분석하기 위해 Russ et al.(2008)은 Machamer et al.(2000)의 연구를 바탕으로 메커니즘 추론 분석틀을 고안하였다. 분석틀에서 하위 추론 요소와 정의 등은 <Figure 1>과 같다. Jeong(2012)은 파브르의 탐구과정에서 나타나는 메커니즘 추론을 분석하기 위해 Russ et al.(2008)의 메커니즘 추론 분석틀을 구체화하였다. Jeong(2012)의 분석틀에서 나타나는 메커니즘 추론의 하위 추론 요소로는 선지식확인, 목표현상기술, 시작조건확인, 활동확인, 대상속성확인, 실체추정, 실체속성확인, 실체확인, 실체조직화가 있다.

Mechanism Code	Description of the Code
Describing the Target Phenomenon	Students demonstrate the particular phenomenon or result they are trying to explain
Identifying Setup Conditions	Students identify the particular setup conditions of the environment that allow the mechanism to start
Identifying Entities	Students identify objects that affect the result of the phenomenon
Identifying Activities	Students identify the actions and interactions that occur among the entities
Identifying Properties of Entities	Students identify properties of entities that are necessary for the mechanism to work
Identifying Properties of Entities	Students explain how the entities are spatially organized, where they are located, and how they organized
Chaining: Backward and Forward	Students reason about one point in the mechanism based on what is known about other stages in the mechanism
Analogy	Students Compare target phenomenon and other phenomenon
Animated model	Students use external model to explain some entities work in the mechanism; gesture, diagram

[Figure 1] A framework for analyzing the mechanistic reasoning(Russ et al., 2008).

<Figure 1>의 분석틀은 다양한 과학교육 상황에 서 메커니즘 추론을 분석하는 많은 연구에서 활용되었다. Russ et al.(2008)은 초등학교 1학년 학생들이 떨어지는 물체에 관해 논의하는 장면을 분석하였다. 그 결과 목표현상 기술로부터 실체확인, 활동확인, 실체속성확인 단계로의 이동이 나타났다. 또 지각한 실체에 대해 친숙하지 못할 경우 속성을 확인하거나 실체를 조직화하는데 어려움을 겪는다는 것을 발견하였다. Russ et al.(2009)는 초등학교 2학년 학생들이 빈 주스박스에서 빨대로 공기를 빼내면 주스 박스가 왜 무너지는지에 대해 추론하는 장면을 분석하여 메커니즘 추론에 주의를 기울이는 교사들은 학생의 설명이 과학적으로는 올바르지 않더라도 충분히 메커니즘적일 경우 학생이 안정적인 메커니즘적 접근을 발달시킨 후에 개념적 피드백을 제공한다고 하였다. 특히 교사가 학생으로 하여금 옳은 정답을 빨리 말하기를 강요할 경우 학생은 더 이상의 메커니즘적 설명을 하지 않고 압력의 개념도 모른채 ‘압력’이라는 과학 용어를 말한다고 하였다. Srisawasdi(2012)는 11학년 학생들의 학습자 그룹에 따른 개방적 탐구과정에서 나타난 메커니즘

추론을 분석한 결과 수용적 그룹 학습자는 약한 증거의 메커니즘 추론을 하고, 정보를 스스로 관리하는 그룹의 학습자는 중간 증거의 메커니즘 추론을 하는 것을 확인하였다. Wulf, Hinko & Finkelstein(2013)은 중학교 학생들의 개방형 탐구와 안내된 탐구에서의 메커니즘 추론을 분석하여 안내된 탐구에서는 목표현상기술, 실체조직 확인의 메커니즘 추론 요소가 많이 발견되고, 개방적 탐구에서는 시작조건 확인, 활동확인, 실체속성확인, 메커니즘 추론 요소가 많았으며, 메커니즘 추론의 수가 안내된 탐구보다 더 많음을 확인하였다. Wilkerson-Jerde, Gravel, & Macrader(2015)는 냄새 확산에 관한 6학년 학생들의 모델링, 메커니즘 추론, 개념 습득에서의 변화를 분석하여 학생들이 모델을 구성하는 과정은 모델을 선택 및 표현하는 과정과 모델을 평가하고 수정하는 과정으로 나뉘며, 각 과정에서 주로 사용되는 메커니즘 추론 요소도 차이가 난다는 것을 확인하였다. Jeong(2012)는 파브르의 탐구과정에 나타난 메커니즘 추론요소가 나타난 순서에 기반하여 3가지 메커니즘 추론 모델(실체확인형 메커니즘 추론 모델, 활동확인형 메커니즘

추론 모델, 실체속성확인형 메커니즘 추론모델)을 개발하였다. 이처럼 과학교육에서 메커니즘 추론과 관련된 연구들은 대부분 Russ et al.(2008)이 고안한 분석틀로 학생들의 담화, 탐구, 논증 속에서 어떤 메커니즘 추론 요소들이 나타나는지를 확인하는데 그치고 있다.

다. 메커니즘의 추론 발달 과정

메커니즘 추론 능력의 발달에 관한 연구들에는 두 가지 입장이 존재한다. 매우 어린 학생들도 자연 현상에 대한 자신의 이해를 지지하기 위해 여러 방식으로 추론할 수 있다(Duschl, Schweingruber, & Shouse, 2007)는 연구를 바탕으로 메커니즘 추론 역시 초등학교 저학년의 어린 학생들의 단편적인 대화를 통해서도 풍부하게 나타난다는 연구(Russ et al. 2008)가 있다. 반면에 초등학생들은 복잡한 장치가 작동하는 것이 직접적으로 보이더라도 인과 관계를 설명하는 것을 어려워하기 때문에, 원인과 결과에 대한 추론은 어린 나이부터 할 수 있지만 메커니즘 추론을 하는 것은 어려워 한다는 연구도 있다(Bolger et al., 2012). 따라서 메커니즘 추론을 할 수 있는 능력에 관한 세밀한 분석이 필요하다.

라. 메커니즘의 추론 전략

Craver(2002)는 메커니즘 추론의 전략으로 어떤 현상을 일으키도록 자극함으로써 그 현상이 일어나도록 하는 속성을 조사하는 활성화 전략, 어떤 요소를 제거함으로써 결과에 야기하는 영향을 관찰하는 활성화 전략, 어떤 요소를 늘리거나 강화함으로써 결과에 미치는 영향을 관찰하는 첨가전략을 제시하였다. Darden(2002)는 스키마 예시화, 모듈 조립, 전향적/후향적 연결을 메커니즘 추론의 전략으로 소개한다. 스키마 예시화는 추상화된 메커니즘 스키마를 덜 추상화된 형태로 만드는 전략으로 과학사나 연관된 영역에서 유추하거나 찾아야 하는 메커니즘의 구성요소에 대해 가설을 설정하는 것을 의미한다. 모듈조립은 메커니즘 구성요소의 그룹에 대한 추론을 하는 것이며, 전향적/후향적 연결은 메커니즘에서 알고 있는 부분을 이용하여 추론하는 것이다. DNA의 이중 나선 구조가 제안되자 어떻게 복제되는지 추론을 할 수 있게 된 것처럼 메커니즘 초기

단계를 이용하여 다음 단계를 추론하는 전향적 방법과, 나중 단계의 실체나 활동에서 그 전단계를 추론하는 방법이 있다. Jeong(2012)는 메커니즘 추론의 전략으로 조건판단, 일반화, 조건통제, 분해, 소개, 대체, 반대로하기, 보존, 비례, 확률, 확증, 반증, 의인화를 언급하였다.

3. 메커니즘 추론의 뇌과학적 접근

뇌에 관한 이해는 학생들의 인지 활동을 과학적으로 분석할 수 있게 하고, 학생들의 학습 과정에 대한 이해를 높일 수 있게 한다. 또한 뇌과학과 교육학의 융합은 학교 교육에 실질적인 기여를 할 수 있다(Kim, 2010).

추론 및 과학적 추론을 뇌과학 관점에서 접근한 연구들이 있다. Kown & Kim(2002)은 뇌의 신경계 발달과 더불어 고등한 사고 활동과 깊은 관계가 있는 전전두엽연합령의 발달이 논리적 사고력 수준과 관계가 있음을 확인했으며, Kown & Chung(1998)은 중학생들의 전두엽연합령의 설계능력과 억제능력이 비율추론 전략의 획득 및 사용능력과 관련되어 있음을 보여주었다. 또 Kown(1998)은 중고등학생에게 설계능력, 억제능력, 작업기억, 과학적 추론 능력, 기압 개념에 대한 이해 능력을 측정하는 과제 또는 검사를 통해 전두엽연합령의 설계능력과 억제능력이 과학적 추론에 유의하게 관련되어 있음을 밝혔다. 이를 바탕으로 메커니즘 추론 전략의 획득 및 사용시에 뇌의 어떤 부분이 활성화되는지 확인할 수 있다.

메커니즘 추론 능력의 차이를 구두 프로토콜 분석을 통해 설명하는 것에서 나아가 신경과학 측면에서 그 차이를 설명할 수 도 있을 것이다. 전문가와 초보자가 메커니즘 추론 과제를 수행할 때 두뇌 활동에는 어떤 차이가 있는지를 살펴봄으로써 가능하다. Cho et al.(1998)은 추론이 많이 요구되는 복잡과제와 추론이 비교적 적게 요구되는 단순 과제 수행 시 일반학생들과 영재학생들의 두뇌활동성을 비교하여 뇌기능영상 측정법을 이용한 영재성 평가의 타당성을 타진하였다. Ha & Song(2005)는 일반학생들과 영재 학생들이 창의적인 문제해결과제를 수행하는 중의 뇌파특성을 비교하였다.

뇌영상기법으로 확인한 메커니즘 추론 능력의 확

득과 전략에 대한 이해는 뇌기반 메커니즘 추론 전략 획득 프로그램 개발로 이어질 수 있으며, 메커니즘 추론 능력 검사 도구를 개발하는데 기반이 된다.

III. 결론

본 연구는 메커니즘 추론 능력에 대해 뇌과학적으로 접근해보고자 하였다. 이를 위해 메커니즘과 메커니즘 추론의 의미와 성격을 정리하고, 과학적 추론과 관련된 신경과학 연구 결과를 정리하여 메커니즘 추론 능력에 대한 신경과학적 접근의 연구 주제를 탐색하였다.

메커니즘 추론 능력 획득에 관한 뇌과학적 접근은 ‘어떤 학생은 메커니즘 추론을 잘 하고, 어떤 학생은 메커니즘 추론을 잘 하지 못하는 이유는 무엇인가?’라는 질문에 답하기 위한 방법이 하나의 방법이 될 것이다.

참고 문헌

Ahn, W., & Kalish, C. W. (2000). The role of mechanism belief in causal reasoning. In F. Keil & R. A. Wilson (Eds.), *Explanation and Cognition* (pp. 199-225). Cambridge, MA: MIT Press.

Bechtel, W., & Abrahamsen, A. (2005). Explanation: A mechanist alternative. *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Science*, 36(2), 421-441.

Bechtel, W., & Richardson, R. C. (1993). *Discovering complexity: Decomposition and localization as strategies in scientific research* (pp. 23-27). Princeton: Princeton University Press.

Bolger, M. S., Kobiela, M., Weinberg, P. J., & Lehrer, R. (2012). Children's mechanistic reasoning. *Cognition and Instruction*, 30(2), 170-206.

Cheng, P. W., & Novick, L. R. (1992). Covariation in natural causal induction. *Psychological Review*, 99(2), 365-382.

Chinn, C. A., & Malhotra, B. A. (2002).

Epistemologically authentic inquiry in schools: A theoretical framework for evaluating inquiry tasks. *Science Education*, 86(2), 175-218.

Craver, C. F. (2001). Role functions, mechanisms, and hierarchy. *Philosophy of Science*, 68, 53 - 74.

Craver, C. F. (2002). Interlevel experiments, multilevel mechanisms in the neuroscience of memory. *Philosophy of Science (Suppl)*, 69, S83 - S97.

Darden, L. (2002). Strategies for discovering mechanisms: Schema instantiation, modular subassembly, forward/backward chaining. *Philosophy of Science*, 69(3), 354-365.

Duschl, R. A., Schweingruber, H. A., & Shouse, A. W. (Eds.). (2007). *Taking science to school:: Learning and teaching science in grades K-8*. Washington, DC: National Academies Press.

Glennan, S. (1996). Mechanisms and the nature of causation. *Erkenntnis*, 44(1), 49-71.

Glennan, S. (2000). Rethinking mechanistic explanation. *Philosophy and Science*, 69, S342 - S353

Glymour, C. (2003). Learning, prediction and causal bayes nets. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(1), 43-48.

Gopnik, A., Sobel, D. M., & Glymour, C. (2001). Causal learning mechanisms in very young children: Two-, three-, and four-year-olds infer causal relations from patterns of variation and covariation. *Developmental Psychology*, 37(5), 620-629.

Gunstone, R. (Eds.). (2015). *Encyclopedia of science education*. Springer, 626-628.

Ha, J. D., & Song, K. A. (2005). Identifying the scientifically giftedness through brain's cognitive function characteristics. *Journal of Gifted/Talented Education*, 15(2), 77-100.

Hur, M., Lawson, A. E., & Kwon, Y. J. (1997). The role of the prefrontal lobes in scientific reasoning. *Journal of the Korean Association for Research in Science Education*, 17(4), 525-540.

Illari, P. M., & Williamson, J. (2012). What is a mechanism? Thinking about mechanisms across the sciences. *European Journal for Philosophy of Science*, 2(1), 119-135.

Jeong, S. (2012). Development of a Mechanistic Reasoning Model based on Fabre's inquiries.

- Korea National University of Education doctor's thesis.
- Kim, D. (2010). Brain science: Its implications for education and the school curriculum. *Journal of Curriculum Studies*, 28(3), 127-145.
- Koslowski, B. (1996). *Theory and evidence: The development of scientific reasoning* (pp. 17-47). Cambridge, MA: MIT Press.
- Kwon, Y. J. (1998). How do the prefrontal lobes mediate scientific reasoning and conceptual change in adolescents?. *Korean Association for Science Education*, 18(3), 437-441.
- Kwon, Y. J. & Chung, W. W. (1998). Why do some students acquire and use more advanced reasoning strategies following instruction, whereas others do not?. *Journal of Science Education*, 22, 97-112.
- Kwon, Y., Lee, I. S., & Lee, J. K. (2010). Development of an fMRI-based model for measuring the ability of drawing conclusions in biology inquiry. *Biology Education*, 38(4), 611-620.
- Kwon, Y. J., & Kim, Y. S. (2002). Effects of cognitive skills of the brain in the development of scientific thinking. *CheongRam Science Education Studies*, 12(1), 16-29.
- Kwon, Y. J., Yang, I. H., & Chung, W. J. (2000). An Explorative Analysis of Hypothesis-Generation by Pre-service Science Teachers. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 20(1), 29-42.
- Lawson, A. E. (1995). *Science teaching and the development of thinking* (pp. 139-147). Belmont, CA: Wadsworth Publishing Company.
- Machamer, P., Darden, L., & Craver, C. F. (2000). Thinking about mechanisms. *Philosophy of Science*, 67(1), 1-25.
- Nersessian, N. (2008). *Creating scientific concepts*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Russ, R. S., Coffey, J. E., Hammer, D., & Hutchison, P. (2009). Making classroom assessment more accountable to scientific reasoning: A case for attending to mechanistic thinking. *Science Education*, 93(5), 875-891.
- Russ, R. S., Hammer, D., & Mikeska, J. (2008). Recognizing mechanistic reasoning in student scientific inquiry: A Framework for discourse analysis developed from philosophy of science. *Science Education*, 92(3), 499-525.
- Schauble, L. (1996). The development of scientific reasoning in knowledge-rich contexts. *Development Psychology*, 32(1), 102-119.
- Srisawasdi, N. (2012). Students' Mechanistic Reasoning about Surface Wettability Phenomena during a Conceptually Causal Design of Hands-on Open-inquiry Science .
- Thagard, P. (2000). *How scientists explain disease*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- van Mil, M. H., Boerwinkel, D. J., & Waarlo, A. J. (2013). Modelling molecular mechanisms: A framework of scientific reasoning to construct molecular-level explanations for cellular behaviour. *Science & Education*, 22(1), 93-118.
- Wilkerson-Jerde, M. H., Gravel, B. E., & Macrander, C. A. (2015). Exploring shifts in middle school learners' modeling activity while generating drawings, animations, and computational simulations of molecular diffusion. *Journal of Science Education and Technology*, 24(2-3), 396-415.
- Wulf, R., Hinko, K., & Finkelstein, N. (2013, July 17-18). Comparing Mechanistic Reasoning in Open and Guided Inquiry Physics Activities. Paper presented at Physics Education Research Conference 2013, Portland, OR. Retrieved April 11, 2016, from <http://www.compadre.org/Repository/document/ServeFile.cfm?ID=13155&DocID=3702>.
- Yang, I. H., Jeong, J. S., Kyown. Y. J., Jeong, J. W., Hur, M., & Oh, C. H. (2006). An Intensive Interview Study on the Process of Scientists' Science Knowledge Generation. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 26(1), 88-96.