

과학적 문제해결을 위한 소집단 논의 과정에서 나타난 비유적 추론의 생성 수준과 설명적 모델 생성의 관계 분석

고민석 · 양일호*

한국교원대학교

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

Ko, Minseok · Yang, Ilho*

Korea National University of Education

Abstract: This study analyzed the relationship among the construct level of analogical reasoning, prediction and uncertainty, and the construction of an explanatory model that were produced during small group discussions for scientific problem solving. This study was participated in by 8 students of K University divided into 2 teams conducting scientific problem solving. The participants took part in discussions in groups after achieving scientific problem solving individually. Through individual interviews afterwards, changes in their thinking through discussion activities were looked into. The results are as follows: The analogy at the Entities/Attributes level was used to make people clearly understand the characteristics of certain objects or entities in the discussions. The analogy at the Configuration/Motion level that was produced during the discussions ensured other participants to predict the results of problem solving. The analogy at the Mechanism/Causation level changed the structure of problem situations either to help other participants to reconstruct the explanatory model or to come up with a new situation that was never been through before to justify the created mechanism and through this, the case of creating Thought Experiments during the discussions were observed. if looking into the changes of analogies, each individual's analogic paradigm during the discussions were shown as production paradigm, reception-production paradigm, production-reception paradigm, and reception paradigm. The construction and reconstruction of the explanatory model were shown in analogic production paradigm, and in the reception paradigm of an analogy, participants changed their predictions or their certainty.

Key words: analogical reasoning, explanatory model construction, scientific problem solving, thought experiment

I. 서론

1. 연구의 필요성 및 목적

자연 현상을 설명하고 예측하기 위해 모델을 생성하고 사용하는 능력은 과학적 소양의 핵심적인 부분으로 학교 과학교육에서 중요하게 다루어져야 할 부분이다(Berland & Reiser, 2008; Clement, 2000; Coll, 2005; Duschl & Osborne, 2002; Gobert & Buckley, 2000; Schwarz *et al.*, 2009). 학생들은 모델을 구성하는 과정에서 개별적인 생각을 표현하게

되며, 이를 정신 모델이라고 하는데, 학생들이 표현한 정신 모델은 과학자에 의해 합의된 개념모델과는 구분된다(Greca & Moreira, 2000). Clement(2008)는 정신 모델의 의미에 대해 문제 상황에 대한 추상적인 형식만을 드러내는 정신 모델과 문제 상황에 대한 실체의 특성을 드러낼 수 있는 설명적 모델의 2가지 유형으로 구분하여 사용하였다. 문제 상황에 대한 실체의 특성을 드러낼 수 있는 설명적 모델은 무엇이 어떻게 발생하는가에 대한 인과적 메커니즘을 밝힐 수 있다(Clement, 2008; Osborn & Patterson, 2011). 이에 이 연구에서 사용되는 모델의 의미는 학생들의

*교신저자: 양일호 (yih118@knue.ac.kr)

**2013.01.30(접수), 2013.03.13(1심통과), 2013.03.31(2심통과), 2013.04.03(최종통과)

생각을 드러내는 정신 모델, 과학자에 의해 합의된 개념 모델과 구분되는 문제 상황에 대한 인과적 메커니즘이 포함된 설명을 드러내는 설명적 모델의 의미로 분류하여 사용하였다.

학생들이 표현한 정신 모델을 이해하면 개념 모델에 대한 이해 정도와 정신 모델의 변화의 정도를 효과적으로 파악할 수 있다. 예를 들어 Steedle과 Shavelson(2009)는 힘과 운동 개념에 대한 학습 발달과정을 이해하기 위해 학생들이 가지고 있는 정신 모델을 4가지 수준으로 설명하였으며, Mualem과 Eylon(2010)은 힘 개념에 대한 정신 모델을 알아볼 수 있는 질문지를 통해 성공적인 물리 문제의 해결과정에 대한 전략을 살펴보고자 하였다. 최근 국내에서도 학생들의 모델의 변화과정을 밝히기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있으며, 사회적 상호작용 과정 속에서 정신 모델이 변해가는 과정을 상세히 보고하였다(이신영 등, 2012; 유희원 등, 2012). 이처럼 정신 모델에 대한 연구들은 외부적으로 표상된 그림이나 글 등을 통해 정신 모델의 변화 과정을 분석하거나, 논쟁을 통해 생성된 정신 모델의 정당화에 초점을 두어 분석하였으며, 최근에는 학습발달과정의 수준을 분석하기 위해 개념 이해 수준에 따른 문항을 개발하는 연구 등이 진행되고 있다.

하지만 이상의 연구들은 학생들이 가지고 있는 개념 변화를 알아보기 위한 연구가 대부분이며, 정신 모델을 생성하고 변화시키는 추론 능력에 대한 연구는 제한적이다. Schwarz 등 (2009)은 영역 일반적인 모델링의 수준을 알아보기 위해 설명과 예측으로써 학습발달과정의 변화를 분석하여 학습발달의 높은 수준에서 자발적인 모델 생성과 변화의 능력이 요구됨을 제시하였다. 이는 학생들이 과학교육을 통해 궁극적으로 함양해야 할 능력이 과학적 소양으로서 모델을 생성하고 사용하는 능력이라고 할 때 모델 생성에 대한 연구가 필요함을 제시한다.

이와 관련하여 Clement(2008)는 과학자들이 비유, 심상 시뮬레이션, 평가적 사고 실험 등의 추론 과정을 거쳐 모델을 생성하는 과정을 보고하였으며, Justi와 Gilbert(2002)는 학생들이 현재의 과학적 모델을 받아들이는 것 뿐 아니라 모델을 수정하고, 자기 자신의 새로운 모델을 만드는데 비유와 사고실험이 중요한 역할을 하고 있음을 밝혔다. 이처럼 비유적 추론(이하 비유)은 문제 상황에서 이미 알고 있는 정보와의 유사

성 또는 관련성을 비교하여 빠르게 사고하는 실용적인 추론 방법으로(Evans, 2002), 창의적 문제 해결과정에서 모델을 생성하는데 중요한 역할을 하는 추론 과정으로 보고되었다(Clement, 2008; Dunbar & Blanchette, 2001; Holyoak & Koh, 1987; Justi & Gilbert, 2002). 이에 이 연구에서는 모델을 생성하는데 있어 비유 전략에 중점을 두어 문제해결과정에서 생성된 비유와 모델 생성과의 관계를 살펴보고자 하며 다음과 같이 몇 가지 관점에서 선행연구와의 차별을 두어 진행하고자 한다.

첫째 비유의 생산적 패러다임의 관점에서 모델 생성과 변화의 역동적인 과정을 분석하고자 한다. 비유의 목적은 유사성을 기반으로 한 문제 해결의 목적 또는 생소한 내용에 대한 이해를 돕기 위해 설명적 목적으로 구분될 수 있다(Bearman *et al.*, 2007). Blanchette와 Dunbar(2000)는 비유의 사용 목적에 따라 비유의 패러다임을 수용적 패러다임과 생산적 패러다임으로 구분하여 제시하였는데, 비유의 수용적 패러다임이 개념이나 원리를 효과적으로 이해시키기 위해 비유를 사용하는 것이라면, 비유의 생산적 패러다임은 다른 사람의 단서나 도움 없이 스스로 비유를 생성하는 것을 말한다. 생산적 패러다임에서 교사나 연구자의 단서 없이 학습자에 의해 자발적으로 창조하는 비유를 자발적 비유라고 한다(Clement, 1988; May *et al.*, 2006). 이와 같은 비유의 패러다임에 비추어 볼 때, 국내과학교육에서 비유의 연구는 교사가 학생들을 효과적으로 이해시키기 위한 수용적 패러다임으로서의 연구가 대부분이다. 수용적 패러다임에서 최근 비유에 대한 연구들은 과학 교육에서 사용되는 비유에 대한 학생들의 이해를 분석하거나 비유물을 수업에 적용하였을 때의 효과와 인식을 연구하였다(강훈식, 서지혜, 2012; 고성자 등, 2007; 권혁순 등, 2004; 변춘수, 김희백, 2010; 양찬호 등, 2010; 유지연, 노태희, 2012; 최선영 등, 2006). 반면 비유의 생산적 패러다임에 관한 연구는 수적으로 제한적이며, 대부분 비유 만들기를 통한 수업의 효과와 인식, 학생들이 생성한 비유의 오류 등을 조사한 연구이다(강훈식, 천지현, 2010; 김유정 등, 2009; 노태희 등, 2009, 노태희 등, 2010). 이러한 연구들은 과학 개념과 대응 할 수 있는 비유물을 직접 만드는 과정에서 새로 학습한 내용을 기존의 인지기조에 통합시켜 효과적으로 이해하기 위한 방법으로 제안되었으며, 모

텔 생성과 관련된 추론의 관점에서 자발적인 비유의 생성에 대한 연구로 보기는 어렵다. 이처럼 지금까지 비유에 대한 국내 과학교육 연구들은 대부분 비유의 수용적 패러다임의 입장에서 진행되었으며, 생산적 패러다임의 입장에서 과학적 모델 생성에 기여하는 비유 생성에 대한 연구는 제한적인 실정이다.

둘째 가설생성과정의 원인적 설명자를 고안하는 과정을 상세히 분석하고자 한다. 비유 전략은 과학탐구 과정 중 가설생성과 밀접하게 관련된다. 권용주 등(2003)은 가설의 생성과정을 귀추의 과정으로 원인적 설명자를 동정하여 최상의 가설적 설명자를 선택하는 과정으로 보고하였는데, 본 연구에서 사용되는 설명적 모델 생성의 의미는 Magnani(1999)의 생성적 귀추의 관점에서 가설적 설명자를 선택하기 위해 또 다른 설명자와의 경쟁관계를 포함하지 않은 원인적 설명자를 동정하는 과정과 일치한다. 지금까지의 귀추적 가설생성과정에 대한 국내의 많은 연구들에서 과거의 경험 상황과 문제 상황의 비유를 통해 원인적 설명자를 고안한다고 보고되었지만(강은미 등, 2006; 권용주 등, 2003; 박은미, 강순희, 2006; 양일호 등, 2006; 이안나 등, 2007), 경험 상황에서 어떻게 문제 상황을 동정하는지 비유의 메커니즘을 보고한 연구는 없었다. 이에 이 연구에서는 설명적 모델의 생성에 기여하는 비유의 수준과 변화를 분석함으로써 비유를 통해 어떻게 원인적 설명자를 동정하는지에 대해 확인하고자 한다.

셋째 지금까지 비유에 대한 많은 연구들에서 과거 경험상황의 회상(retrieval), 대응(mapping), 전이(transfer)에 초점이 되어왔으며, 이러한 연구들은 문제 상황을 이해하기 위해 유사한 경험을 떠올리고, 문제해결을 위해 문제 상황과 경험상황을 대응하고 전이하는 과정을 보고하였다(Gentner & Markman, 1997; Holyoak & Koh, 1987; Jee *et al.*, 2010). 이와 더불어 Clement(1988)는 문제 상황을 변형하여 새로운 비유 상황을 구성하는 문제 상황의 변형을 통한 비유의 생성의 사례를 보고하였다. 이와 같이 문제 상황의 변형으로부터 생성된 비유는 문제 상황을 해결하기 위해 과거의 경험 지식을 단순히 회상하는 것이 아니라, 문제 상황을 잘 설명할 수 있는 새로운 모델을 구성하는 심상의 변화 과정으로 창의적 사고의 중요한 아이디어가 되며, 문제해결과정에서 이러한 구성적 추론 과정을 통해 심상 시뮬레이션을 수행하

게 된다(Ball & Christensen, 2009; Clement, 2008; Nersessian & Chandrasekharan, 2009). 예를 들어 과학의 역사에서 아인슈타인의 시간여행 사고실험, 뉴턴의 대포알 사고실험의 사례는 문제 상황의 변형으로부터 생성된 비유적 추론에 따른 심상 시뮬레이션의 사례라고 할 수 있다. 이와 같은 사고실험의 생성은 과학적 모델을 생성하고 평가하는 과정에서 중요한 역할을 하고 있으며, 과학교육에 시사하는 점이 크다(Klassen, 2006; Reiner & Gilbert, 2000; Stephens & Clement, 2006). 이 연구에서는 역동적인 심상 변화의 증거로서 문제 상황의 변형을 통한 비유의 생성 사례와 사고실험의 사례를 확인하고자 하였다.

이상과 같은 논의를 통해 국내 과학교육에서 모델 생성에 기여하는 비유의 생성과 변화에 대한 연구는 제한적임을 알 수 있다. 이에 이 연구에서는 과학적 문제 해결을 위한 소집단 논의 과정에서 생성된 비유의 수준과 상호작용, 예측의 불확실성을 분석하여 설명적 모델 생성과의 관계를 살펴보고자 한다. 이를 통해 비유의 생성 수준이 논의과정에서 개인의 설명적 모델 생성에 어떠한 영향을 미치는지, 개인의 정신 모델이 어떻게 다른 참여자들의 정신 모델과 상호작용하며 설명적 모델을 생성하는지를 보다 심층적으로 확인할 수 있을 것이다.

II. 연구 방법

1. 연구 참여자

이 연구의 참여자는 4년제 K 대학에 재학 중인 대학생 8명이었으며, 모두 자발적으로 연구에 참여하기를 희망하였다. 연구 참여자의 연령은 22-24세였으며, 성별에 따라 남자 4명과, 여자 4명의 조로 구성되었다. 연구에서 알아보고자 하는 것이 과학적 개념의 변화를 알아보는 것이 아니라 모델 생성과 관련된 추론으로써 자발적 비유의 생성과 변화를 심층적으로 분석하는 것이기 때문에, 일정 수준 이상의 지식과 추론 수준을 가진 집단인 대학생을 연구 참여자로 선정하였다. 연구에 참여한 대학생은 4명 2개조로 편성되어 과학적 문제해결과정에 참여하였다. 연구 참여자들은 과학적 문제해결과정에서 과제를 개별적으로 수행한 이후, 조별로 모여 논의에 참여하였다. 이후 다시 개별적 면담을 통해 소집단 논의활동을 통한 사고

의 변화를 알아보았다.

2. 과제 선정

Ball 등(2009)은 비유가 불확실한 조건에서 눈에 띄게 관찰되며, 불확실성을 해결하는데 효과적인 전략이라고 보고하였다. 따라서 알고 있는 지식이나 경험을 이용하여 쉽게 해결할 수 있는 과제는 적합하지 않으며, 참여자가 문제를 해결하기 위해 머릿속으로 다양한 이미지를 그려보고 바꾸어볼 수 있는 결과가 불확실한 상황의 과제를 찾고자 하였다. 이에 이 연구에서는 스프링 과제(Clement, 1988)를 사용하였다. 스프링 과제는 스프링의 길이나 감긴 횟수, 굵기 등 다른 변인들이 모두 같은 상태에서, 직경이 다른 스프링에 같은 무게의 추를 매달았을 때 늘어나는 길이의 변화를 예측하고 그 원인을 설명하는 과제이다. 이미 Clement(1988)는 스프링 과제를 이용하여 과학자들의 자발적 비유 생성을 보고하였으며, 본 연구를 시행하기 전 대학생 2명을 대상으로 한 사전 테스트에서 문제 해결을 위해 다양한 비유를 생성하는 것을 확인하였다. 이 연구의 목적이 비유 생성 수준에 대한 심층적인 분석과 사례를 확인하기 위함으로 연구 목적에 따라 의도된 과제를 사용하고자 하였으며, 스프링 과제를 이용하는 것이 과학자들의 비유 생성과 비교하여 참여자들의 비유 생성을 살펴보고, 소집단 논의에 따라 생성된 비유의 수준과 변화를 분석하기에 적합하다고 판단하였다.

3. 자료 수집

이 연구에서 자료 수집은 개인의 문제해결과정, 소집단 논의를 통한 문제해결과정, 사후 면담 순으로 이루어졌다. 먼저 개인의 문제해결과정에서 비유의 생성을 살펴보기 위해 과학적 문제해결 과제에 대한 사고발성법을 사용하였다. 개인의 문제해결과정에서 비유의 생성을 분석하기 위해서는 참여자들의 순간적인 사고를 분석할 필요가 있으며, 이를 위해 사고발성법이 필수적인 방법이다. 따라서 과제 투입 전 사고발성법에 대한 충분한 설명과 훈련을 통해 참여자가 자신의 생각을 자연스럽게 이야기할 수 있도록 하였다. 과학적 문제해결과제는 개인별로 투입되었으며, 각 개인별로 과제의 해결책에 대해 더 이상 새로운 생각이

떠오르지 않을 때까지 시간이 부여되었으며, 각 개인별로 10-15분의 시간이 소요되었다.

이후 소집단 논의를 통한 문제해결과정에서 비유의 생성을 분석하기 위해 4명의 참여자들은 한 곳에 모여 문제 해결에 참여하였다. 참여자들은 돌아가면서 자신의 예측 결과에 대한 자신의 의견과 이유를 제시하였으며, 다른 참여자의 의견에 의문이 생겼을 때 질문하고 답변하는 과정으로 진행되었다. 논의 과정은 15-20분간 진행되었다.

마지막으로 소집단 논의 활동이 끝난 후 비유 생성 변화의 원인을 살펴보기 위해 심층면담을 실시하였다. 면담의 주요내용은 문제해결과제에 대한 최종적인 설명적 모델이 무엇인지, 논의과정을 통해 설명적 모델이 변하였는지, 변하였다면 왜 변하였는지였다. 이 과정에서 사고발성법을 사용하지 않은 까닭은 논의에 따른 변화를 좀 더 심층적으로 살펴보기에는 사고발성법이 제한이 되었기 때문이다.

4. 자료 분석

자료 분석을 위해 수집한 자료들에 대해 비유의 생성 수준, 상호작용, 결과 예측에 대한 불확실성을 분석하였으며 각각의 분석방법은 다음과 같다. 또 분석의 신뢰도를 높이기 위해 과학교육전문가 2인의 분석 결과와의 일치도를 확인하였다.

1) 비유의 수준 분석

Rivet과 Kastens(2012)은 지구시스템과 이를 설명하기 위한 물리적 모델간의 비유 관계를 설명하기 위해 Gentner(1983)의 비유의 4가지 수준을 수정하여 실제/속성, 공간적 배치/움직임, 메커니즘/인과성의 3가지 수준으로 구분하여 참여자들의 추론 수준을 살펴보았다. 실제/속성 수준(Level1)의 비유가 사물 대 사물, 사물의 특징 간의 전이를 추론하는 것이라면, 공간적 배치/움직임 수준(Level2)의 비유는 모델과 실제 간의 위치나 상대적인 위치 변화를 고려하여 전이하는 수준의 추론이다. 마지막으로 메커니즘/인과성 수준(Level3)의 비유는 모델과 지구시스템 간의 작동원리나 메커니즘 수준의 유사성을 추론하는 것이라고 할 수 있다. 또한 지구시스템과 물리적 모델간의 비유를 생성하지 못한 경우 Level0의 수준으로 분석하였다. Rivet과 Kastens(2012)의 비유의 수준 분석

들은 지구시스템과 모델과의 관계에서 공간적 추론을 고려한 수준의 분석틀이며, 이 연구의 과제인 스프링 과제 역시 공간적 추론을 고려하여 예측하는 과제이기 때문에 문제 상황에 대한 참여자들의 비유의 수준을 분석하기에 적합하다고 판단하여 실제/속성(Level1), 공간적 배치/움직임(Level2), 메커니즘/인과성(Level3)의 3가지 수준에 따라 문제해결 상황에서 생성되는 비유의 수준을 분석하였으며, 각각의 분석 기준 및 사례는 연구 결과에 상세히 제시하였다.

2) 비유의 상호작용 분석

논의과정에서 비유의 상호작용을 분석하기 위해 비유 사용에 따라 비유의 수용적 패러다임과 생산적 패러다임으로 분류하였다(Blanchette & Dunbar, 2000). 논의과정은 참여자가 의견을 주고받으며 비유를 생성하고, 수용하는 복잡한 상황이기 때문에 생산적 패러다임과 수용적 패러다임이 함께 나타난다. 이에 이 연구에서는 참여자가 최초로 이전과 다른 상황의 비유를 생성하였을 때를 비유의 생산적 패러다임으로 분류하였고, 다른 참여자가 이를 받아들여 예측이나 불확실성에 변화를 나타낸 경우를 비유의 수용적 패러다임으로 분류하여 논의과정에서 비유의 패러다임을 분석하였다.

3) 결과 예측에 대한 불확실성 분석

결과 예측에 대한 불확실성은 참여자가 사용한 용어의 불확실성을 통해 분석하였다. Christensen과 Schunn(2009)은 ‘아마도’, ‘어쩌면’, ‘모르겠다’ 등의 불확실성과 관련된 용어들을 통해 설계과정에서

결과 예측에 대한 불확실성을 분석하였다. 이에 이 연구에서는 불확실성의 정도를 확인하기 위해 예측과 관련하여 ‘아마도’, ‘어쩌면’, ‘모르겠다’, ‘어떻게 해결해야하지?’ 와 같은 불확실성의 용어가 나타난 경우 ‘불확신’으로 분석하였으며, 불확신의 용어가 나타나지 않은 경우 ‘불확실성 없음’으로 분석하였다.

4) 자료 분석의 검증

수집된 자료는 수집이 끝난 후 곧바로 전사하였으며, 각각의 분석틀에 따라 분석하였다. 분석의 타당도를 확보하기 위한 과정으로 연구자 이외에 과학교육전문가 2인과의 논의를 통해 분석틀의 세부 내용에 대한 의미를 분명히 하였으며, 신뢰도를 확보하기 위해 개별적으로 자료를 분석 한 후 분석자간 일치도를 확인하였다. 최초 분석자간 내적 일치도는 .92였으며, 분석내용의 불일치는 상호협의를 통해 최종적으로 하나의 의견으로 조정할 때 까지 분석이 진행되었다.

Ⅲ. 연구 결과 및 논의

1. 개인의 문제해결과정에서 생성된 비유의 수준과 설명적 모델 생성의 관계

가. 개인의 문제해결과정에서 생성된 비유의 수준 분석

개인의 문제해결과정에서 생성된 비유의 수준과 설명적 모델 생성과의 관계를 분석하기 위해 자발적 비유 생성 사례 수, 비유의 생성 수준, 설명적 모델 생성 여부, 결과 예측, 예측의 불확실성을 분석하여 표1과 같이 나타내었다.

표 1 연구 참여자의 자발적 비유 생성과 설명적 모델 생성의 관계(개인의 문제해결과정)

참여자	자발적 비유 생성 사례 수	비유의 생성 수준(프로토콜 수)			설명적 모델 생성 여부	결과 예측	예측의 불확실성
		실체/속성	공간적배치/움직임	메커니즘/인과성			
A-여	5	3	1	1	0	2번	없음
B-여	2	1	0	1	0	같음	불확신
C-여	0	0	0	0	X	같음	불확신
D-여	0	0	0	0	X	2번	불확신
E-남	1	0	1	0	X	2번	없음
F-남	2	0	2	0	X	2번	없음
G-남	0	0	0	0	X	2번	없음
H-남	0	0	0	0	X	1번	불확신

개인의 문제해결과정에서 자발적 비유를 생성한 참여자는 A, B, E, F 참여자였으며, 나머지 C, D, G, H 참여자는 비유를 생성하지 않았다. 참여자들이 자발적으로 생성한 비유의 수준에 따라 분석한 결과는 다음과 같다.

실체/속성 수준의 비유는 사물 대 사물, 사물의 특징을 비교하는 비유의 수준으로 사물의 공간적 배치나 움직임을 언급하지 않는 수준의 추론이다. 실체/속성 수준의 비유는 문제를 해결하는데 있어 직접적인 도움을 주지는 못하였지만, 대상의 특징을 파악하여 문제 상황을 이해하는데 도움을 주었다. A참여자는 폭이 좁은 스프링의 특징을 파악하는 과정에서 말려 있는 납을 떠올렸고, 폭이 넓은 스프링의 특징을 파악하는 과정에서 말려 있는 철사의 비유를 떠올렸다. 즉 각각의 실체/속성 수준의 비유를 통해 사물 간의 특징을 비교할 수 있으며, 이후 관계를 파악하게 된다.

A : 납땀 같은 거 말려 있는 것을 많이 본 것 같은데..느낌상 이게 힘을 적게 받을 것 같고..

A : 근데 딱 생각해보았을 때 큰 스프링을 말려있는 모양을 생각하면 철사 동그랴게 말아놓거나..

공간적 배치/움직임 수준의 비유는 사물의 위치나 상대적인 위치를 변화하는 수준의 추론이다. 공간적 배치/움직임 수준의 비유는 대상 간의 위치나 움직임의 변화를 통해 대상간의 관계를 확인하기 위해 사용되었지만, 원인이나 메커니즘을 밝히지는 못하였다. 예를 들어 A참여자의 사례에서 A참여자는 스프링 모양의 플라스틱 장난감을 잡아 당기거나, 계단에서 내려오게 할 때의 경험 상황을 떠올려 설명하고 있으나, 이러한 상황 속에서 스프링이 잘 늘어나는 원인이나 메커니즘은 확인되지 않는다.

A : 어렸을 때 갖고 노는 지렁이 같은 거 아시겠나 모르겠는데, 플라스틱 스프링 같은 거 말려 있어 가지고 계단위에 놓으면 막 떨어지는 게 있어요. 그런게 좀 그런걸 스프링이라 치면 좀 굵잖아요..그것도 위에서 잡아당겨보면은 굉장히 많이 늘어나고 그렇다 생각이 드는데 만약에 그것과 같은 재질로 애를 만든다면은 좀 신축성이라든가 늘어나는면에서 아무래도 굵은 것보다 계단에서 내려오는게 못할 거 같고..추를 달면 많이

안 늘어날 거라는 생각이 들었어요.

그렇다하더라도 공간적 배치/움직임 수준의 비유는 사물 간의 관계를 확인하여 예측에 대한 불확실성과 관계가 있음을 확인할 수 있었다. 연구 결과에서 공간적 배치/움직임 수준의 비유를 떠올린 A, E, F 참여자는 자신의 예측에 대해 불확실성이 나타나지 않았다.

메커니즘/인과성 수준의 비유는 대상 간의 원리나 메커니즘을 비교하는 수준의 추론이다. 개인의 문제해결과정에서 메커니즘/인과성 수준의 비유는 문제의 메커니즘을 설명하기 위해 문제 상황의 구조를 변형하여 비유를 생성하는 모습으로 나타났다. Clement(1988)는 자발적 비유 생성의 3가지 유형으로 법칙에 따른 비유 생성, 관계에 따른 비유 생성, 변형에 따른 비유 생성으로 분류하였다. 이 중 변형에 따른 비유 생성이란 문제를 해결하기 위해 문제 상황의 변인(스프링의 직경, 늘어나는 길이)이 아닌 고정된 특징(스프링의 두께, 스프링의 나선 모양)을 변형한 상황을 떠올리는 것으로(Clement, 1988), 문제 상황에 대한 구조를 변화시킴으로써 새로운 방식의 추론을 돕는다(Griffith *et al.*, 2000). 즉 문제 상황에 도움을 줄 수 있는 기억의 회상이 아니라 문제 상황의 구조를 변형하였으며, 이러한 변형된 상황에서 메커니즘이 포함된 설명이 시도되었다. 이처럼 문제 상황의 변형을 통한 비유는 단순히 공간적 배치/움직임 수준의 대응 관계를 확인하고 기억하는 것이 아니라 메커니즘을 설명하기 위해 의도적으로 구성된 비유 상황이며, 문제 상황의 스프링과 변형된 스프링의 대응 관계의 메커니즘이 유지되고, 설명되기 때문에 메커니즘/인과성 수준의 비유로 분석하였다. 이 연구에서 설명적 모델은 문제 상황의 변형을 통한 비유 상황에서 생성되었으며, 이에 대한 구체적인 사례는 다음 설명적 모델의 생성 사례에서 자세히 살펴보고자 한다.

한편 문제 상황에 대한 비유를 생성하지 않은 C, D, G, H 참여자는 다음과 같이 문제의 결과에 대해 직관적으로 예측하였다.

C : 사실 잘은 모르겠지만 웬지 똑같은 것 같기도 하고,,별..직경이 다르다고 해서 크게 차이가 있을 것 같지는 않아요. 어차피 늘어나는 것만 더 튼거니까 그치만 길이가 다르니까 어떻게 더 길

려나? ……어… 굳이 고른다면 두번째가 더 많이 늘어날 것 같아요. 그냥 애가 더 기니까 왠지 더 많이 늘어날 것 같아요..어쨌든 간에 직경이 …… 근데 사실 잘 모르겠는데 똑같거나 굳이 고른다면 두번째가..

D : 같은 재질이고 같은 두께인 거죠? .. 뭔가 1번이 더 빨리 내려올 것 같은데..결국에는 똑 같은 길이로 내려와 있을 것 같아요..어. 2번이 더 기니까……늘어놓으면 더 길잖아요……그래서 더 길게 내려올까 생각해 봤는데..안그리고 결국 똑같이 길이로 되 있을 것 같아요..그것을 뭐 물리적으로 말은 못하겠고요..

이처럼 비유를 생성하지 않고 직관을 통해 결과를 예측한 참여자들의 경우 설명적 모델을 생성하지 못하였으며, 예측 결과에 대해서도 불확실한 모습을 보였다.

나. 개인의 문제해결과정에서 설명적 모델의 생성 사례

개인의 문제해결과정에서 A참여자와 B참여자의 사례를 통해 메커니즘/인과성 수준의 비유 생성과 설명적 모델의 생성과의 살펴보고자 한다. 이들은 모두 문제 상황의 변형을 통해 비유를 생성하였으며, 변형된 문제 상황을 통해 스프링이 늘어나는 메커니즘이 포함된 설명적 모델을 생성하였다.

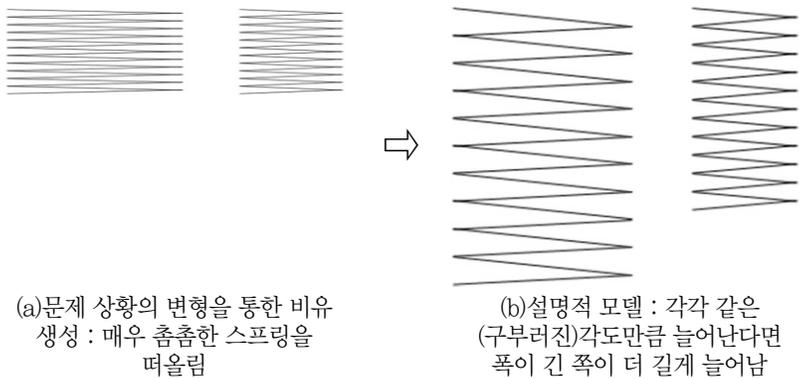
먼저 A참여자의 사례를 살펴보면, A참여자는 문제 상황의 스프링을 변형하여 좀 더 촘촘한 상태의 스프링을 떠올리고, 같은 무게의 추를 매달았을 때 폭이 좁은 스프링과 폭이 넓은 스프링의 벌어지는 각도는

동일할 것이라고 가정하였다. 그렇기 때문에 같은 각도만큼 벌어지게 된다면 폭이 넓은 스프링의 길이가 더 길기 때문에 그 길이만큼 아래로 더 늘어날 것이라고 설명하였다.

A : ...머릿속으로 스프링을 그려봤는데..애랑 애랑 지금 그림 상에서는 다섯 번 여섯 번 씩 밖에 안 달려 있어서, 이쪽이 좀 더 많이 늘어날 거라 생각했는데, 애가 좀 더 촘촘히 감겨 있다고 생각하고, 애도 좀 더 같은 간격으로 촘촘히 감겨 있다고 생각하고 ... 이 작은 원은 추를 달았을 때 맨 밑에 감겨있는 요 스프링 부분이 조금 벌어지고, 그 벌어진 만큼이 위가 계속 벌어지면서 요만큼이 될 것 같다고 생각하면, 애 같은 경우는 밑에 추를 걸면은 아무래도 이 힘 받는 부분 쪽이 1번 짧은 이 아니라 작은 스프링보다 이쪽이 좀 더 길이가 길어버리니까 중심에서 와 버리는 길이가.. 애가 이 만큼이 더 많이 늘어나고, 제일 첫 번째가 많이 늘어난 만큼 위가 계속 늘어난다고 생각해보면은 애가 훨씬 더 길게 늘어날 거라 생각했어요….

다음 B참여자의 사례를 살펴보면, B참여자는 3차원의 스프링의 모습을 변형하여 2차원 스프링 단면을 떠올린 후, 처음 스프링 사이의 각도가 유지된 채 늘어나기 때문에 각각 같은 각도로 스프링이 늘어날 것이라고 이야기 하였다.

B : 이게 입체적으로 생각하기에는 3차원적이라 설명이 어려우니까 단면도로 잘라서 생각을 해보



(a)문제 상황의 변형을 통한 비유 생성 : 매우 촘촘한 스프링을 떠올림

(b)설명적 모델 : 각각 같은 (구부러진)각도만큼 늘어난다면 폭이 긴 쪽이 더 길게 늘어남

그림 1 A참여자의 문제 상황의 변형에 따른 비유 생성과 설명적 모델 생성

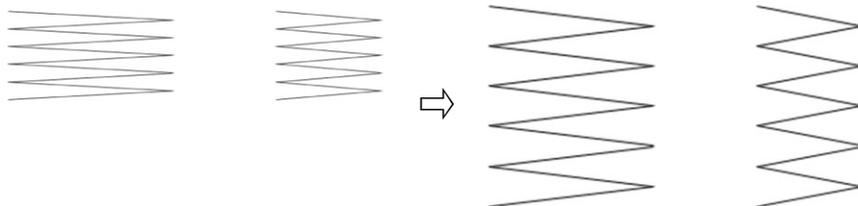
려고 했는데 그렇게 하니깐 단면으로 자르면 늘어났다고 가정을 하고... 일정한 각도로 이렇게 보일거예요...이렇게 그니까..사선으로 나타낼 거고. 이 역시도 단면으로 자르면 일정한 각도로 사선으로 나타낼 건데..제가 처음에 생각했을 때는 이게 기니까 더 많이 내려갈까 하고 생각했는데 사실 각도는 각도의 문제지 길이가 영향을 주지 않더라고요 단면으로 잘랐을 때도 같은 각이니까.. 그래서... 둘이 같은 각도로 내려오고 같은 수가 같기 때문에 같은 지점에서 끝이 날 거라는 생각이 들었습니다.

A참여자자와 B참여자자의 문제 상황의 변형에 다른 비유 생성 사례를 통해 다음과 같은 결과를 확인할 수 있었다. 첫째 변형에 따른 비유 생성은 문제의 원인에 대한 메커니즘을 추론하여 설명적 모델을 생성하는데 기여하고 있었다. 사례에서 A참여자자와 B참여자자는 변형에 따른 비유를 생성한 후 문제의 원인에 대한 설명적 모델을 구성하였으나, 변형에 따른 비유를 생성하지 못한 다른 참여자는 모두 설명적 모델을 생성하는데 실패하였다. 둘째 변형에 따른 비유는 문제 상황의 구조를 변형하는 것으로 문제 상황의 구조적 변화가 추론에 미치는 영향을 확인할 수 있었다. A참여자자와 B참여자자가 생성한 변형에 따른 비유 상황의 차이점은 매우 촘촘한 단면을 떠올리느냐, 문제 상황에서 제공된 스프링의 단면을 떠올리느냐였다. A참여자자가 매우 촘촘한 단면을 떠올렸을 때 두 스프링의 각도는 무시할 만큼 작아졌으며, 각각 같은 각도만큼 늘어남으로써 폭이 긴 쪽이 더 길게 늘어남다는 메커니즘과 함께 설명적 모델을 구성하였다. 반면 B참여자자는 문제에서 제시한 스프링의 2차원 단면을 떠올렸기 때문에 처음

상태의 각도를 다르게 생각하였고, 이후 처음 상태의 각도가 각각 일정하게 늘어나므로 같은 길이로 늘어남다는 설명적 모델을 구성하였다. 이와 같은 문제 상황의 구조 변화에 따른 추론의 변화를 Griffith 등 (2000)의 구조-작용-기능의 체계에 따라 분석하여 보면, A참여자자와 B참여자자는 문제의 작용(메커니즘)을 모두 (구부러진)각도로 보았지만, 변형된 구조의 차이에 의해 다른 결과 예측(기능)을 나타냈다. 즉 A참여자자와 B참여자자의 사례에서 설명적 모델의 변화가 아주 미세한 구조 변화의 차이에 의해서도 발생할 수 있음을 확인하였다. 즉 이는 과학교육에서 교사가 제시하는 모델의 작은 구조적 변화에 따라서도 참여자들의 모델 생성과 예측에 영향을 줄 수 있음을 시사한다.

마지막으로 앞서 공간적 배치/움직임 수준의 비유를 생성한 A참여자자가 예측 결과에 대해 불확실성을 나타내지 않았던 것과 비교하여 공간적 배치/움직임 수준의 비유 생성 없이 문제 상황의 변형에 따른 비유를 생성한 B참여자자는 예측 결과에 대해 불확실해 하는 모습이 나타났다. 표1에서 A참여자자는 실체/속성 수준의 비유, 공간적 배치/움직임 수준의 비유를 생성한 후 변형 비유를 생성한 반면, B참여자자는 다른 비유의 생성 없이 곧바로 변형 비유를 생성하였다. 실제 문제해결과정에서 B참여자자는 자신의 직관과 문제 상황의 변형에 따른 비유를 통해 구성한 설명적 모델 사이에서 매우 혼란스러운 모습을 보였다.

B : 근데 평소에 생각할 때 용수철이 이렇게 직경이 얇은 경우가 더 촘촘했던 경우가 많아서.. 사실 경험상으로는 2번이 더 많이 늘어날 것 같은데.. 참 어렵네요.. 어떻게..해결해야 되지? 음..근데 역시 용수철과 직경과 상관없이 늘어나는 길이



(a)문제 상황의 변형을 통한 비유 생성 : 스프링의 단면을 떠올림

(b)설명적 모델 : 처음 상태의 (구부러진)각도가 유지된 채 각각 일정하게 늘어나므로 같은 길이로 늘어남

그림 2 B참여자자의 문제 상황의 변형에 따른 비유 생성과 설명적 모델 생성

가 같을 것 같은데.. 음...어떻게 말해야 될지 모르겠어요.

즉 A참여자자와 B참여자자의 사례에서 문제 상황을 변형한 비유를 생성하였고, 이는 설명적 모델 생성에 기여하였지만, 공간적 배치/움직임 수준의 비유 생성 여부에 따라 불확실성의 정도가 다름을 확인할 수 있었다.

지금까지의 결과를 통해 개인의 문제해결과정에서 나타난 비유의 생성 수준을 분석하였을 때, 실체/속성 수준, 공간적 배치/움직임 수준, 메커니즘/인과성 수준에 따른 사례를 확인할 수 있었다. 실체/속성 수준의 비유는 문제 상황을 파악하는데 도움을 주었으며, 공간적 배치/움직임 수준의 비유는 공간적 움직임과 관련된 경험 상황을 떠올려 예측 결과에 대한 불확실성을 낮추었으며, 메커니즘/인과성 수준의 비유에서는 문제의 해결을 돕기 위해 문제 상황의 구조를 변형하는 문제 상황의 변형에 따른 비유 생성의 사례가 나타났다. 이와 같은 문제 상황의 변형에 따른 비유 생성의 사례는 기억으로부터 회상하는 것이 아니라 문제 상황을 잘 설명할 수 있는 새로운 모델을 생성하는 심상의 변화 과정으로서(Ball & Christensen, 2009; Clement, 2009; Nersessian & Chandrasekharan, 2009), 연구 결과를 통해 스프링에 대해 심상을 떠올리고, 조작하는 심상 시뮬레이션의 생성과 수행을 확인할 수 있었다.

2. 소집단 논의를 통한 문제해결과정에서 생성된 비유의 수준과 설명적 모델 생성 관계

가. 소집단 논의를 통한 문제해결과정에서 생성된 비유의 수준 분석

이 연구에서 알아보고자 하는 중요한 문제는 소집단 논의에 따른 문제해결과정에서 생성된 비유의 수준과 상호작용을 분석하는 것이다. 이를 알아보기 위해 소집단 문제해결과정에서 생성된 비유의 수준을 분석하여 변화를 살펴보았다. 논의의 전체적인 흐름을 파악하기 위해 생성된 비유의 수준 프로토콜과 함께 결과 예측(직관 수준의 예측 포함), 설명적 모델, 불확실성을 살펴볼 수 있도록 그림3, 그림4와 같이 나타내었다. 그림3과 그림4에서 ○, △, □도형의 변화는 예측 결과의 변화를 의미하며, 도형의 색(회색, 흰색)은 예측에 대한 불확신과 불확실성 없음을 의미한

다. 또 세로축의 변화는 아래 방향부터 각각 직관 수준의 예측, 실체/속성 수준의 비유, 공간적 배치/움직임 수준의 비유, 메커니즘/인과성 수준의 비유, 설명적 모델(비유 생성 없이 메커니즘을 설명)을 의미한다. 마지막으로 가로축의 변화는 생성된 프로토콜의 시간 순서에 따른 변화를 나타낸다.

소집단 논의과정에서 생성된 비유의 사례를 수준별로 분석한 결과는 다음과 같다. 첫째 실체/속성 수준의 비유(1-8, 1-11, 1-12, 1-15, 2-14)는 개인의 문제해결과정과 마찬가지로 논의과정에서도 문제와 관련된 상황을 파악하고 확인하는데 도움을 주고 있었다. 논의 과정에서 상대방의 설명에 궁금한 것을 서로 이야기하며, 어떠한 실체나 속성의 특징을 보다 명료하게 이해시키기 위해서 비유를 생성하였다. 예를 들어 1조의 논의 과정에서 B참여자자가 스프링을 매단 위치에 대해 명확하게 설명하기 위해 과학시간에 사용했던 스프링의 모습을 예를 들어 설명하였다.

B : 이게 근데 끝에 매단게 아니에요? 스프링 끝에?

A(1-8) : 저는 어떻게 생각했나면? 스프링 가운데 부분에 이렇게 철사를 올려서 요렇게 철사를 올렸다고 생각을 했어요..과학 수업시간에 추 달 수 있는 스프링을 보면은 추 달 수 있게 된 부분이 가운데 있지 않나요? 그렇게 생각해서 가운데 일거라 생각했어요.

이처럼 참여자는 스프링의 모습을 직접 관찰할 수 없었지만 실체/속성 수준의 비유를 통해 과학시간에 사용했던 스프링의 심상을 떠올리고, 물체의 속성을 확인하는 모습이 나타난다.

둘째 논의과정에서 생성된 공간적 배치/움직임 수준의 비유(2-5, 2-6, 2-10, 2-11, 2-12)는 예측 결과에 대한 불확실성을 낮추어주었다. 2조의 논의과정 후반부에 H참여자자는 결과에 대해 불확실성이 나타나지 않았다(그림4). 논의가 끝난 후 H참여자자와의 사후면담에서 H참여자자는 자신에게 가장 영향을 주었던 설명이 무엇이었냐는 질문에 “스프링 장난감의 움직임” 비유라고 이야기 하였다. 그 이유에 대해 H참여자자는 어렸을 때 자신이 가지고 놀던 경험이 생각나서 쉽게 이해되었다고 이야기 하였다. 이와 같은 결과에서 논의과정에서 한 참여자가 생성한 비유가 다른 참여자들의 결과 예측에 대한 불확실성에 영향을 주고 있음

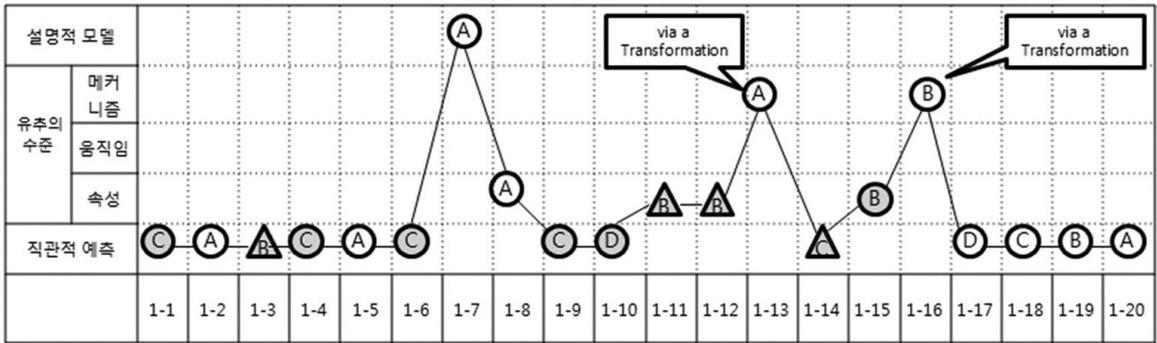


그림 3 1조 참여자가 논의과정에서 생성한 비유의 수준과 예측, 불확실성의 변화

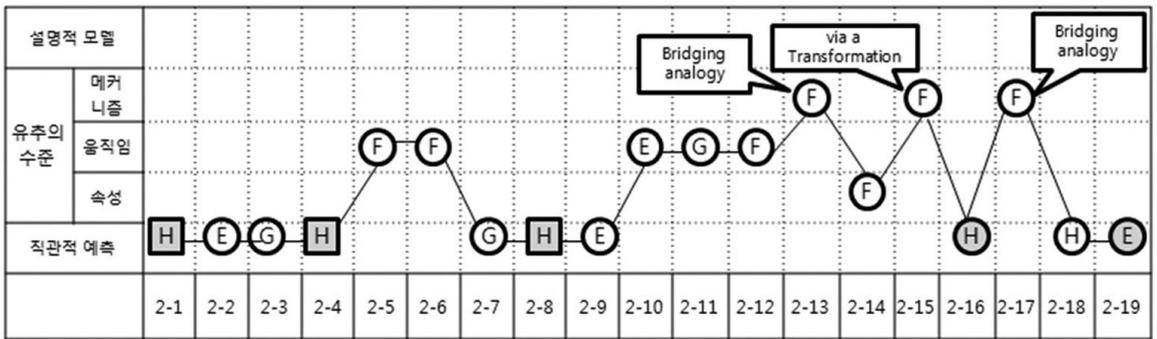


그림 4 2조 참여자가 논의과정에서 생성한 비유의 수준과 예측, 불확실성의 변화

- : 폭이 긴 스프링이 많이 늘어날 것이라 예측
- △ : 같은 길이로 늘어날 것이라 예측
- : 폭이 짧은 스프링이 많이 늘어날 것이라 예측
- 회색/흰색 : 예측에 대해 불확신/ 불확실성 없음

을 확인할 수 있었다. 즉 자신이 자발적으로 공간적 배치/움직임 수준의 비유를 생성하지 못하더라도 논의과정에서 다른 참여자들의 비유를 수용하여 문제해결결과를 예측하는데 도움을 받을 수 있었다. 하지만 공간적 배치/움직임 수준의 비유가 다른 참여자들에게 수용되기 위해서는 같은 경험을 공유하였는가가 중요하다. 사례에서 H참여자 역시 스프링 장난감의 움직임을 경험해 보았기 때문에 사례를 듣고 스프링 장난감의 이미지를 즉시 떠올릴 수 있었다. 이를 통해 과학 교육에서 비유를 사용할 때에는 참여자 수준에 맞는 비유(참여자 경험해본 비유)를 사용하는 것이 효과적임을 알 수 있다.

셋째 메커니즘/인과성 수준의 비유 생성은 문제 상황의 구조를 변화시켜 다른 참여자가 설명적 모델을 재구성하는데 도움을 주었다(1-13, 1-16). 1조의 논의과정에서 A참여자는 개인의 사고과정에서 생성한 것

같은 매우 촘촘히 감긴 스프링 변형비유를 사례를 생성하였는데, 이는 문제 상황에 대한 구조적 변화를 만들어주었고, 이후 B참여자가 설명적 모델을 재구성하는데 영향을 주었다.

A(1-13) :어 근데 방금 얘기하시는 거 듣고 저도 생각을 해 봤는데.. 많이 감겨 있을 수록이라는 말에서..아까 무슨 생각을 했냐면요..머릿속으로 그림 상에서는 용수철의 간격이 넓잖아요? 이 용수철 하나하나 감긴게..그런데 이걸 촘촘하게 붙여서 감았다고 생각하면은 그 머릿속으로 딱 그림을 그려봤을 때 잡아당긴다고 생각을 하면은 1번 촘촘하게 감은 것 보다 2번 이 굵직하게 지름이 넓은 게 이 간격이 더 넓은 거라고 생각이.....

B(1-16) : 머릿속으로 철사를 감아본다고 생각을 했을 때 촘촘히 감은 철사랑 설게 감은 철사를 땡

겨본다고 상상을 해보면 왠지 굵게 감은 철사가 잘 늘어날 것 같다는 생각이 들어요. 그니까 직경이 넓게..그래서 지금 이 용수철이 가지는 힘이 생기는 이유가 이걸 구부렸기 때문이라고 가정을 하면, 이게 아무래도 덜 구부린 것이기 때문에 더 촘촘히 구부린 경우가 더 이 용수철에 힘이 더 많이 생기지 않을까 생각을 했어요.

B참여자는 A참여자의 변형비유 사례를 듣고, 동시에 자신의 설명적 모델을 재구성하는 모습이 나타났다. 다시 말해서 매우 촘촘한 스프링을 떠올리게 되어 A참여자의 변형 비유 상황을 받아들여, 그 과정에서 촘촘히 감은 철사와 설게 감은 철사의 구부린 정도가 다르기 때문에 촘촘한 용수철에 힘이 더 많이 생긴다고 이야기하였다. 이처럼 논의과정에서 B참여자의 설명적 모델의 재구성 논의 과정에서 변형 비유 생성을 통한 문제 상황에 대한 구조적 변화가 설명적 모델 생성에 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다. Griffith 등(2000)은 과학적 문제해결에서 나타나는 Funtion-Follow-Form(FFF) 추론의 형태를 SBF(Structure-Behavior-Function) 체계로 분석하였다. 여기서 SBF 체계는 문제 상황의 구조 - 행동 - 기능의 변화를 이끄는 추론 체계로 문제해결과정에서 문제 상황의 구조적 변화를 통해 문제 해결의 행동과 기능에 영향을 주며, 이를 통해 인과적 설명을 구성하는 것이 가능하다고 하였다.

또한 논의 과정에서 반복된 비유의 수용은 문제해결결과에 대한 예측을 바꾸어 놓기도 하였다. H참여자는 논의과정에서 비유를 생성하지 않았으나 다른 참여자들의 비유를 수용하여 예측의 결과를 바꾸었다. H참여자가 처음 가지고 있던 직관은 직경이 짧기 때문에 추를 유지하려는 힘이 작다는 것이었으며, F참여자의 비유 설명을 듣고 “추를 매달았을 때, 초기에는 1번이 더 늘어나고 끝에는 2번이 늘어난다.”고 예측 결과가 바뀌었다. 또 이어 E, G, F참여자의 비유 설명을 듣고 나서 예측의 결과를 바꾸었다. 이처럼 H참여자는 논의과정을 통해 설명적 모델을 생성하지는 못하였지만, 논의 과정은 문제에 대한 결과 예측의 변화에 영향을 주고 있었다.

한편 논의과정에서 비유를 수용하는 참여자는 생성된 비유를 그대로 받아들이지 않고, 생성된 비유의 적절성을 비판적으로 판단하고 평가한 후 받아들였다.

2조 참여자들의 논의에서 F참여자는 가장 먼저 “김연아 피겨 선수의 팔의 모양과 회전 속도”의 움직임/공간적 배치 수준의 비유를 생성하여 자신의 설명을 정당화하고자 하였으나 다른 참여자들에게 받아들여지지 않았다.

F(2-6) : 김연아..김연아도 회전할 때 팔 벌리고 돌면은 천천히 돌다가 딱 팔을 좁히면 빨리 돌잖아..그런 것처럼 이렇게 면적이 작으면..

G : 이걸 회전력이랑 비교하기는 그렇고..

이처럼 F참여자가 생성한 비유는 문제 상황의 속성/실체와 일치하지 않았기 때문에, 논의과정 속에서 다른 학생들에게 수용되지 않았다. 이를 통해 논의 과정에서 학생들의 상호작용을 통해 생성된 비유의 적절성이 평가되고 있음을 확인할 수 있었다.

나. 소집단 문제해결과정에서 설명적 모델의 생성 및 정당화 사례

2조의 문제해결과정에서 F참여자는 메커니즘/인과성 수준 비유의 또 다른 사례를 생성하였으며(그림5), F참여자의 사례를 통해 설명적 모델의 생성 및 정당화의 과정을 살펴보고자 한다. F참여자는 학교 운동장 모래사장을 보호하기 위해 묻혀 있는 페타이어를 밟고 놀던 비유 상황을 떠올렸으며, 휘어지는 정도가 좁을수록 잘 안 눌러졌던 경험상황을 떠올렸다. 이는 휘어짐이라는 인과적인 요소를 가지고 있고, 메커니즘 수준의 관계가 유지되고 있기 때문에 메커니즘 수준의 비유로 분석할 수 있다. 또한 이 사례에 대해 보충하기 위해 불국사 아치형 다리의 비유(실체/속성 수준) 사례를 추가로 제시하였다. 그리고 스프링 문제 상황의 구조를 변형하여 직경이 다른 원의 일부분의 상황을 떠올려 메커니즘을 설명하였다. 마지막으로 휘어진 정도가 다른 활에 비유하여 설명하는 모습이 나타난다. 이 사례에서 설명적 모델은 문제 상황의 변형을 통해 직경이 다른 원의 휘어짐을 나타내는 비유 상황으로부터 생성되었으며, 휘어진 정도가 다른 활을 상상하였을 때 더 많이 휘어진 활을 구부리기가 더 힘들다는 비유 상황과 운동장 모래사장의 페타이어를 밟았을 때 휘어진 정도가 좁을수록 잘 안 눌러진다는 비유 상황을 통해 자신의 설명적 모델을 정당화하고 있었다.

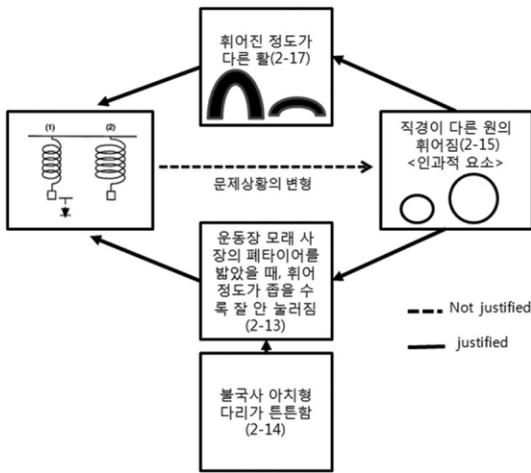


그림 5 논의과정에서 F참여자의 비유생성을 통한 설명적 모델의 생성과 정당화

이와 같이 F참여자는 개인의 문제해결과정에서는 설명적 모델을 생성하지 못하였지만, 논의를 통한 문제해결과정에서 다른 참여자를 설득하는 동안 더 많은 수의 비유를 생성하였으며, 이 과정에서 자발적으로 설명적 모델을 생성하였다.

이 과정에서 나타난 메커니즘 수준의 비유를 정리하면 다음과 같다. 첫째 직경이 다른 스프링의 문제 상황을 직경이 다른 원의 일부분으로 떠올리는 문제 상황의 변형에 따른 비유를 생성하였다. 이는 앞서 개인의 사고 과정에서 나타난 메커니즘 수준의 비유 사례와 일치한다. 즉 직경이 다른 원의 일부분으로 문제 상황의 구조를 변형하여 휘어짐이라는 인과적 요소를 생각할 수 있었으며, 개인의 사고과정에서 자발적으로 변형 비유를 생성하지 못하였던 참여자가 다른 참여자를 설득하고 정당화하는 소집단 논의 과정에서 문제 상황의 구조를 변형하는 모습이 나타남을 확인하였다. 이 과정에서 생성된 변형에 따른 비유는 문제에 대한 인과적 메커니즘을 떠올려 설명적 모델을 구성하는 데 중요한 역할을 하고 있었다. 둘째 F참여자는 자신의 설명적 모델을 정당화하기 위해 메커니즘 수준의 비유 상황을 떠올리고 있는 것이 확인되었다. 하지만 이는 문제 상황의 구조를 변형하는 것과는 다른 유형의 사례로 변형 비유 상황의 메커니즘을 정당화하기 위해 메커니즘 상황이 유지된 채 이전에는 경험하지 못하였던 새로운 상황을 떠올려 적용하는 형태로 나타났다. 즉 직경이 다른 원의 일부분의 휘어짐

이라는 변형비유 상황을 정당화하기 위해 휘어진 정도가 다른 활을 떠올렸으며, 문제 상황의 메커니즘이 유지된 채 새로운 상황을 떠올리고 있음을 알 수 있다. Clement(2008)는 이와 같은 비유의 사례가 문제 상황과 변형 비유 상황간의 확신을 높여주는 역할을 하고 있으며, 연결 비유(bridging analogy)라고 보고 하였다. 이와 같은 연결 비유의 사례는 과학의 역사에서 과학자들이 수행한 사고실험의 특별한 사례라고 이야기하였으며, 설명적 모델의 정당화를 위한 평가적 기능을 갖는다고 하였다(Clement, 2008). 전문가들과 다르게 참여자는 이 연구에서 개인의 사고에서는 이러한 설명적 모델의 정당화를 위한 평가의 과정이 나타나지 않았다. 따라서 개인의 사고과정에서 나오지 않았던 복잡한 추론이 논의 과정에서 확인되었으며, 이것은 논의 과정을 통해 생성된 설명적 모델이 정교화, 타당화되고 있음을 보여주는 결과이다.

다. 소집단 논의를 통한 문제해결과정에서 생성된 비유의 상호작용 분석

소집단 논의 과정에서 참여자들의 비유 생성과 수용의 상호작용이 설명적 모델의 구성에 어떠한 영향을 주고 있는지 살펴보기 위해 표2와 같이 논의 전과 논의 과정의 간의 비유의 수준, 설명적 모델 생성, 예측, 불확실성 차이를 비교하여 살펴보았으며, 이를 통해 비유의 생산적 패러다임과 수용적 패러다임을 분류하여 논의 과정에서 상호작용을 분석하였다. 참여자가 최초로 논의에서 생성되지 않은 다른 상황의 비유를 생성하였을 때를 비유의 생산적 패러다임으로 분류하였고, 다른 참여자가 이를 받아들여 예측이나 불확실성에 변화를 나타낸 경우를 비유의 수용적 패러다임으로 분류하였다.

먼저 1조의 상호작용을 세부적으로 살펴보면, 논의 전 설명적 모델을 구성하였던 A참여자는 논의과정에서 생산적 패러다임을 나타내었고, B참여자는 논의 과정 초기에 수용적 패러다임에서 A참여자의 비유를 받아들인 후, 논의의 후반 생산적 패러다임에서 비유를 생성하였다. 설명적 모델을 구성한 A참여자와 B참여자가 비유의 생산적 패러다임에서 주도적으로 논의를 이끌었으며, C학생과 D참여자의 경우 논의과정동안 수용적 패러다임에서 다른 참여자들의 비유를 받아들여 예측의 결과를 바꾸거나 불확실성이 낮아지는 모습이 확인되었다. 다음 2조의 상호작용을 살펴보

표 2

소집단 논의 전과 논의 과정에서 비유의 수준, 설명적 모델 생성, 예측, 불확실성 비교

참여자	비유의 생성 수준		설명적 모델 생성		논의 과정에서 예측 변화	논의 과정에서 불확실성 변화	논의과정에서 비유 사용의 패러다임 변화
	논의 전	논의 과정	논의 전	논의 과정			
A-여	Level 3	Level 3	생성	생성	넓은 쪽	없음	생산
B-여	Level 3	Level 3	생성	재구성	같은→넓은 쪽	불확신→없음	수용→생산
C-여	Level 0	Level 0	X	X	넓은 쪽	불확신→없음	수용
D-여	Level 0	Level 0	X	X	넓은 쪽	불확신→없음	수용
E-남	Level 2	Level 2	X	X	넓은 쪽	없음→불확신	생산→수용
F-남	Level 2	Level 3	X	생성	넓은 쪽	없음	생산
G-남	Level 0	Level 2	X	X	넓은 쪽	없음	생산
H-남	Level 0	Level 0	X	X	좁은 쪽→넓은 쪽	불확신→없음	수용

면, 2조의 참여자는 논의 전 설명적 모델을 생성한 참여자가 없었으나, 논의 과정에서 F참여자도 설명적 모델을 생성하였고, F, G참여자의 비유의 생성 수준에도 변화가 있었다. 2조의 참여자들의 경우 비유의 생산적 패러다임은 폭이 넓은 스프레이가 많이 늘어난다고 예측한 E, F, G참여자가 이끌었으며, 폭이 좁은 스프레이가 많이 늘어난다고 예측한 H참여자는 비유의 수용적 패러다임에서 이를 받아들여 예측의 결과를 바꾸고, 결과에 대한 불확실성이 낮아졌다. 하지만 E참여자의 경우 논의과정 후반부에 불확실성이 나타났는데, 이러한 이유에 대해 사후 면담에서 E참여자는 F참여자가 생성한 메커니즘/인과성 수준의 비유가 자신의 처음 생각과 일치하지 않았기 때문에 결과에 대해 혼란스러워했다고 이야기 하였다.

이와 같은 연구 결과를 통해 논의과정 중에 사용된 비유의 역할을 정리하면 다음과 같다. 논의 과정 중 생산적 패러다임에서 사용된 메커니즘/인과성 수준의 비유는 논의에 참여한 개인이 설명적 모델을 생성하고 설명적 모델을 정당화하는 것과 관련되었다. 생산적 패러다임에서 사용된 메커니즘/인과성 수준의 비유는 메커니즘을 설명하기 위해 문제 상황을 변형한 비유 생성과 변형된 비유 상황에서 설명된 메커니즘을 정당화하기 위해 메커니즘이 유지된 채 새로운 상황을 떠올리는 연결 비유의 유형으로 나타났다. 논의 과정 중 수용적 패러다임에서 사용된 실체/속성, 공간적 배치/움직임 수준의 비유는 문제 상황을 파악하고 이해하는데 도움을 주었으며, 결과 예측에 대한 불확실성을 낮추어 주거나 예측의 결과를 바꾸어 준 반면,

메커니즘/인과성 수준의 비유는 설명적 모델의 생성을 돕기도 하나 처음 생각과의 갈등을 유발하여 예측 결과에 대한 불확실성을 높이기도 하였다. 이와 같은 결과는 Blanchette와 Dunbar(2000)가 비유의 생산적 패러다임에서는 깊은 구조적 특징에 기반하여 비유를 사용하고, 수용적 패러다임에서는 표면적 유사성에 기반을 두어 비유를 사용하고 있음을 보고한 것과 비교해 볼 수 있다. 이 연구에서는 비유의 수준을 실체/속성, 공간적 배치/움직임, 메커니즘/인과성 수준으로 더욱 세분화하여 분석하였으며, 이를 통해 생산적 패러다임과 수용적 패러다임에서 비유의 사용을 심층적으로 살펴볼 수 있었다.

V. 결론 및 제언

이 연구에서는 과학적 문제해결과제에 대한 개인의 문제해결과정과 소집단 논의를 통한 문제해결과정에서 생성된 비유의 수준과 상호작용, 결과 예측의 불확실성을 분석하여 설명적 모델의 생성과의 관계를 논의하였다.

첫째 개인의 문제해결과정에서 참여자는 속성/실체 수준, 공간적 배치/움직임 수준, 메커니즘/인과성 수준의 비유를 생성하였다. 속성/실체 수준의 비유는 대상의 특징을 파악해 문제 상황을 이해하는데 도움을 주고 있었으며, 공간적 배치/움직임 수준의 비유는 공간적 움직임에 대한 경험상황을 떠올려 예측에 대한 불확실성을 낮추어주었다. 개인의 문제해결과정에서 생성된 메커니즘/인과성 수준의 비유는 메커니즘을

설명하기 위해 문제 상황의 변형에 따른 비유 생성의 형태로 나타났다. A참여자자와 B참여자자는 문제 상황의 변형에 따른 비유를 생성을 통해 설명적 모델을 생성하였으며, 문제 상황의 구조적 변화의 작은 차이가 설명적 모델의 생성과 예측에 차이를 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.

둘째, 논의 과정에서 참여자가 생성한 비유의 수준을 분석해보면, 속성/실체 수준의 비유는 논의 과정에서 상대방의 설명에 궁금한 것을 서로 질문하며, 어떠한 실체나 속성의 특징을 보다 명료하게 이해시키기 위해 사용되었다. 논의과정에서 생성된 공간적 배치/움직임 수준의 비유는 다른 참여자가 문제해결결과를 예측하는 데 불확실성을 낮추어주었다. 메커니즘/인과성 수준의 비유 생성은 문제 상황의 구조를 변화시켜 다른 참여자가 설명적 모델을 재구성하는데 도움을 주었다. 또 논의 과정에서 문제 상황의 변형을 통해 설명적 모델을 생성하였으며, 자신이 생성한 설명적 모델의 메커니즘을 정당화하기 위해 메커니즘 관계가 유지된 채 이전에는 경험하지 못하였던 새로운 비유 상황을 떠올리는 연결 비유(bridging analogy), 사고실험의 사례를 확인하였다. 또한 논의 과정에서 반복된 비유의 수용은 문제해결결과에 대한 예측을 바꾸어 놓기도 하였다. 하지만 논의과정에서 비유를 수용하는 참여자는 생성된 비유를 무조건 수용하지 않았으며, 생성된 비유의 적절성을 비판적으로 판단하고 평가한 후 받아들였다.

셋째 소집단 문제해결과정에서 생성된 비유의 변화를 살펴보면, 논의과정에서 각 개인의 비유의 패러다임은 생산적 패러다임, 수용-생산 패러다임, 생산-수용 패러다임, 수용 패러다임으로 나타났다. 설명적 모델의 생성 또는 재구성은 비유의 생산적 패러다임에서 나타났으며, 비유의 수용적 패러다임에서 참여자는 예측을 바꾸거나, 예측에 대한 불확실성이 변하였다. 특히 설명적 모델 생성에 기여한 비유는 생산적 패러다임으로서 메커니즘/인과성 수준의 비유였으며, 이 연구에서는 문제 상황을 변형하여 생성된 변형 비유와 변형된 비유 상황의 메커니즘을 정당화하기 위한 연결비유의 2가지 유형의 메커니즘 수준/인과성 수준의 비유 사례를 확인하였다.

또한 지금까지 연구를 통해 복잡한 논의과정 속에서 나타나는 참여자들의 추론을 분석할 수 있는 효과적인 방법을 제시하였다. 첫째 비유의 패러다임 분석

을 통해 복잡한 상호작용이 나타나는 논의 상황에서 참여자들의 추론을 비유의 생산적 패러다임과 수용적 패러다임 구분하여 분석할 수 있었다. 둘째 비유의 수준 분석을 통해 설명적 모델 생성에 기여하는 추론의 수준을 확인할 수 있었으며, 이를 통해 과학적 문제해결을 위한 논의과정에서 생성되는 비유의 수준별 역할을 살펴보았다. 셋째 비유를 통한 모델 생성 및 재구성의 과정에 대한 연구는 가설 생성과정에서 경험 상황으로부터 어떻게 원인적 설명자를 동정하게 되는지를 상세하게 설명해 주었다. 실체/속성 수준의 비유를 통해 문제 상황의 특징을 확인하고, 공간적/움직임 수준의 비유를 통해 문제 상황과 경험상황과의 관계를 확인하며, 마지막으로 메커니즘/인과성 수준의 비유를 통해 문제 상황을 변형하여 설명하며, 정당화하는 과정을 확인하였다. 이러한 연구 결과를 통해 경험 상황의 회상 이외에도 문제 상황의 변형을 통해 설명적 모델을 생성하는 관점에서 가설 생성 과정을 바라볼 수 있음을 시사한다. 마지막으로 이 연구를 통해 과학적 문제해결상황에서 메커니즘 수준의 비유를 통해 새로운 심상을 떠올리고 공간 변형적 추론을 통해 문제를 해결하는 역동적인 심상의 변화과정인 심상 시뮬레이션의 사례를 확인할 수 있었다. 이는 앞으로 공간 변형적 추론 능력이 강조되는 물리, 지구과학 학습과 관련되어 학생들의 모델 생성에 관련된 추론을 이해하는 데 유용한 방법이 될 것으로 기대된다.

국문 요약

이 연구는 과학적 문제해결을 위한 소집단 논의과정에서 생성된 비유의 수준, 상호작용, 결과 예측에 대한 불확실성을 분석하여 설명적 모델과의 관계를 논의하였다. 이 연구의 참여자는 4년제 K 대학에 재학 중인 대학생 8명으로 4명 2개조로 편성되어 과학적 문제해결과제를 수행하였다. 연구 참여자들은 개별적으로 과학적 문제해결과제 수행한 이후, 조별로 모여 논의에 참여하였다. 이후 다시 개별적 면담을 통해 소집단 논의 활동을 통한 사고의 변화를 알아보았다. 이 연구의 결과는 다음과 같다. 논의 과정에서 속성/실체 수준의 비유는 논의 과정에서 어떠한 실체나 속성의 특징을 보다 명료하게 이해시키기 위해 사용되었다. 논의과정에서 생성된 공간적 배치/움직임 수준의 비유는 다른 참여자가 문제해결결과를 예측하는

데 불확실성을 낮추어주었다. 메커니즘/인과성 수준의 비유 생성은 문제 상황의 구조를 변화시켜 다른 참여자가 설명적 모델을 재구성하는데 도움을 주거나, 자신이 생성한 메커니즘을 정당화하기 위해 메커니즘 상황이 유지된 채 이전에는 경험하지 못하였던 새로운 상황을 떠올려 적용하는 형태의 비유로 생성되었으며, 이를 통해 논의과정에서 사고실험의 생성 사례를 확인할 수 있었다. 소집단 과정에서 생성된 비유의 변화를 살펴보면, 논의과정에서 각 개인의 비유 패러다임은 생산적 패러다임, 수용-생산 패러다임, 생산-수용 패러다임, 수용 패러다임으로 나타났다. 설명적 모델의 생성과 재구성은 비유의 생산적 패러다임에서 나타났으며, 비유의 수용적 패러다임에서 예측이 바뀌거나, 예측에 대한 불확실성이 달라졌다.

참고 문헌

- 강은미, 신동훈, 권용주 (2006). 과학 지식 생성 학습을 통한 초등학생들의 가설 지식 생성 능력의 발달. 한국과학교육학회지, 25(3), 257-270.
- 강훈식, 서지혜 (2012). 포화 용액 개념 학습에서 비유 표현 방식과 언어적 학습 양식에 따른 비유 사용 수업의 효과. 한국과학교육학회지, 32(2), 402-414.
- 강훈식, 천지현 (2010). 초등학생의 학습접근양식에 따른 비유 만들기 특성, 대응 관계 이해도, 대응 오류, 비유 만들기에 대한 인식. 한국과학교육학회지, 30(5), 668-680.
- 고성자, 최선영, 여상인 (2007). 과학 수업에서 초등교사가 사용하는 비유 유형에 대한 사례 연구. 초등과학교육, 26(3), 276-285.
- 권용주, 정진수, 박윤복, 강민정 (2003). 선연적 과학 지식의 생성 과정에 대한 과학철학적 연구-귀납적, 귀추적, 연역적 과정을 중심으로-. 한국과학교육학회지, 23(3), 215-228.
- 권혁순, 최은규, 노태희 (2004). 화학 교육에서 사용되는 비유에 대한 학생들의 이해도 및 비유 사용의 제한점. 한국과학교육학회지, 24(2), 287-297.
- 김유정, 문세정, 노태희 (2009). 크로마토그래피 개념에 대해 중학교 과학영재가 만든 비유의 유형과 대응 오류 및 비유 만들기 활동에 대한 인식 조사. 한국과학교육학회지, 29(8), 861-873.
- 노태희, 양찬호, 강훈식 (2009). 포화 용액 개념에 대해 초등 과학 영재와 일반 학생들이 만든 비유의 특성과 대응 관계 이해도 및 대응 오류. 초등과학교육, 28(3), 292-303.
- 박은미, 강순희 (2006). 유사 경험의 제공이 귀추에 의한 가설 성정에 미치는 효과. 한국과학교육학회지, 26(3), 356-366.
- 변춘수, 김희백 (2010). 학생 중심 비유 활용 수업이 중학생의 광합성 개념 이해에 미치는 영향. 한국과학교육학회지, 30(2), 304-322.
- 양일호, 정진수, 권용주, 정진우, 허명, 오창호 (2006). 과학자의 과학지식 생성 과정에 대한 심층 면담 연구. 한국과학교육학회지, 26(1), 88-98.
- 양찬호, 김경순, 노태희 (2010). 과학 수업에서 비유의 사용 방식이 학생들의 개념학습에 미치는 영향. 한국과학교육학회지, 30(8), 1044-1059.
- 유지연, 노태희 (2012). 이해와 검토 단계를 강조한 비유 실험 설계 전략을 활용한 탐구수업에서 나타나는 과학 영재 사이의 언어적 상호작용 분석. 한국과학교육학회지, 32(4), 671-685.
- 유희원, 함동철, 차현정, 김민석, 김희백, 유준희, 박현주, 김찬중, 최승언 (2012). 달의 위상 변화에 대한 과학적 모형 구성 수업에서 나타나는 과학 영재들의 모형 생성 및 발달과정. 영재교육연구, 22(2), 291-315.
- 이신영, 김찬중, 최승언, 유준희, 박현주, 강은희, 김희백 (2012). 소집단 상호작용에 따른 심장 내 혈액 흐름에 대한 소집단 모델 발달 유형과 추론 과정 탐색. 한국과학교육학회지, 32(5), 805-822.
- 이안나, 권용주, 정진수, 양일호 (2007). 동물 행동학자의 연구 활동에서 나타나는 연구 단계, 사고과정, 행동양식 및 생성 지식에 관한 연구. 한국생물교육학회지, 35(3), 361-373.
- 최선영, 이은정, 강호감 (2006). 초등과학 학습에서의 창의력 향상을 위한 시각적 비유학습의 효과. 한국과학교육학회지, 26(2), 167-176.
- 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.
- Bearman, C. R., Ball, L. J., & Ormerod, T. C. (2007). The structure and function of spontaneous analogising in domain-based problem solving. *Thinking & Reasoning*, 13(3), 273-294.
- Berland, L. K., & Reiser, B. (2008). Making sense of argumentation and explanation. *Science Education*, 93(1), 26-55.
- Blanchette, I., & Dunbar, K. (2000). How analogies are

generated: the roles of structural and superficial similarity. *Memory & Cognition*, 28(1), 108-124.

Christensen, B. T., & Schunn, C. D. (2009). The role and impact of mental simulation in design. *Cognitive Psychology*, 23(3), 327-344.

Clement, J. (1988). Observed methods for generating analogies in scientific problem solving. *Cognitive Science*, 12(4), 563-586.

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. (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.

Coll, R. K. (2005). The role of models/and analogies in science education: Implications from research. *International Journal of Science Education*, 27(2), 183-198.

Dunbar, K., & Blanchette, I. (2001). The in vivo/in vitro approach to cognition: the case of analogy. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(5), 334-339.

Duschl, R. A., & Osborne, J. (2002). Supporting and promoting argumentation discourse in science education. *Studies in Science Education*, 38(1), 39-72.

Evans, J. St. B. T. (2002). Logic and human reasoning: An assessment of the deduction paradigm. *Psychological Bulletin*, 128(6), 978-996.

Gentner, D. (1983). Structure-mapping: A theoretical framework for analogy. *Cognitive Science*, 7(2), 155-170.

Gentner, D., & Markman, A. B. (1997). Structure mapping in analogy and similarity. *American Psychologist*, 52(1), 45-56.

Greca, I. M., & Moreira, M. A. (2000). Mental models, conceptual models, and modeling. *International Journal of Science Education*, 22(1), 1-11.

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.

Holyoak, K. J., & Koh, K. (1987). Surface and structural similarity in analogical transfer. *Memory & Cognition*, 15(4), 332-340.

Klassen, S. (2006). The science thought experiments: How might it be used profitably in the classroom?. *Interchange*, 37(1-2), 77-96.

Jee, B. D., Uttal, D. H., Gentner, D., Manduca, C.,

Shiple, T. F., Tikoff, B., Ormand, C. J., & Sageman, B. (2010). Commentary: Analogical thinking in geoscience education. *Journal of Geoscience Education*, 58(1), 2-13.

Justi, R., & Gilbert, J. K. (2002). Modelling, teachers' views on the nature of modelling, and implications for the education of modellers. *International Journal of Science Education*, 24(4), 369-387.

May, D. B., Hammer, D., & Roy, P. (2006). Children's analogical reasoning in a third-grade science discussion. *Science Education*, 90(2), 316-330.

Magnani, L. (1999). Model-base creative abduction. In L. Magnani, N. J. Nersessian, & R. Thagard (Eds.), *Model-based reasoning in scientific discovery*(pp.219-238). New York, NY: Kluwer Academic/Plenum Publishers.

Mualem, R., & Eylon, B. S. (2010). Junior high school physics: Using a qualitative strategy for successful problem solving. *Journal of Research in Science Teaching*, 47(9), 1094-1115.

Nersessian, N. J., & Chandrasekharan, S. (2009). Hybrid analogies in conceptual innovation in science. *Cognitive Systems Research*, 10(3), 178-188.

Osborne, J. F., & Patterson, A. (2011). Scientific argument and explanation: A necessary distinction?. *Science Education*, 95(4), 627-638.

Reiner, M., & Gilbert, J. (2000). Epistemological resources for thought experimentation in science learning. *International Journal of Science Education*, 22(5), 489-506.

Rivet, A. E., & Kastens, A. K. (2012). Developing a construct-based assessment to examine students' analogical reasoning around physical models in earth science. *Journal of Research in Science Teaching*, 49(6), 713-744.

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.

Steedle, J. T., & Shavelson, R. J. (2009). Supporting valid interpretations of learning progression level diagnoses. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 699-715.

Stephens, L., & Clement, J. (2006). Designing classroom thought experiments: What we can learn from imagery indicators and expert protocols. In *Proceedings of the NARST 2006 Annual Meeting*, San Francisco, CA.