

과학적 설명 구성 도구를 통한 초등 예비교사의 설명 수준 변화와 도구의 어포던스 탐색

김종욱 · 임성은[†]

Changes in Explanatory Levels of Elementary Pre-service Teachers through a Scientific Explanation Construction Tool and Exploration of Its Affordances

Kim, Jong-Uk · Lim, Sung-Eun[†]

국문 초록

과학적 설명 구성은 과학의 본질적 실행임에도 불구하고 교사들은 과학적 설명의 형식적 구조에 익숙하지 않으며 좋은 과학적 설명을 평가하는 기준 역시 지니고 있지 못한 경우가 많다. 그에 따라 본 연구는 과학적 설명의 개념을 명료히 하고 과학적 설명 구성을 안내할 수 있는 과학적 설명 구성 도구를 제안하고 이 도구가 예비교사들의 응결 현상에 대한 설명 수준 변화에 미치는 영향을 탐색하였다. 연구 결과 총 네 단계의 설명 구성 수준 중 상당수의 예비교사는 사전에 기술(description) 수준에 머물렀으나 이 도구의 활용을 통해 연관적(associative) 수준 이상의 설명을 구성하는 것으로 나타났다. 또한 이 도구는 예비교사들이 현상을 설명하기 위한 개념적 틀을 정립하고 논리적 설명과 미시적 해석을 이끄는 어포던스를 지니는 것으로 분석되었다. 이 연구는 예비교사들이 과학적 설명에 대한 형식과 준거를 이해하고 이를 자신의 설명 구성에 적용할 수 있음을 보여주었다는 점에서 의의를 지닌다. 앞으로 다양한 주제와 분과 영역에서 예비교사들의 과학적 설명 수준 향상을 위한 노력이 수반되어야 할 것이며, 나아가 예비교사들에게 실제적인 환경 속에서 학생들이 과학적 설명을 구성할 수 있도록 장려하는 수업 경험을 제공할 필요가 있다.

주제어: 과학적 설명, 과학적 설명 구성 도구, 어포던스, 예비교사

ABSTRACT

While scientific explanation is a fundamental component of science, teachers often lack familiarity with the formal structure of scientific explanations and the criteria for assessing their quality. Consequently, this study aims to clarify the concept of scientific explanation and proposes a tool for constructing scientific explanations. The primary objective is to explore the tool's impact on enhancing the explanatory skills of pre-service teachers when it comes to the phenomenon of condensation. The research findings indicate that many pre-service teachers initially operated at a description level during the pre-test. However, the implementation of the tool enabled them to advance their explanatory skills beyond the associative level. Notably, the tool was analyzed for its ability to provide pre-service teachers with a conceptual framework for explaining phenomena and guiding logical explanations and micro-level interpretations. This study holds significance in demonstrating that pre-service teachers can comprehend the formalities and criteria of scientific explanations and apply them to enhance their own explanatory abilities. Moving forward, efforts should be made to enhance the scientific explanation level among pre-service teachers across various topics and subject areas. Furthermore, pre-service teachers need classroom experiences that foster the construction of scientific explanations in authentic contexts.

2023.10.13(접수), 2023.10.23(1심통과), 2023.11.01(최종통과)

E-mail: skyblue8435@snu.ac.kr(임성은)

Key words: scientific explanation, scientific explanation construction tool, affordance, pre-service teacher

I. 서 론

기후변화나 팬데믹과 같이 우리 삶에 큰 영향을 미치는 현상에 대해 우리가 예측과 통제를 할 수 있는 까닭은 그러한 현상에 대해 과학적인 이해를 하고 있기 때문이다. 이와 같이 과학의 일차적인 목표는 과학적 설명(scientific explanation)을 통해 자연현상에 대한 이해를 산출하는 것이며, 이를 바탕으로 현상에 대한 예측과 통제를 하는 것은 과학의 이차적 목표라 할 수 있다(McCain, 2022). 이러한 맥락에서 과학적 설명이란 관찰 가능한 특정 상황에 대한 단순한 기술(‘무엇’에 대한 응답)을 넘어 그 현상이 ‘어떻게’, 그리고 ‘왜’ 생겼는가에 대한 이론적이고 기계론적인 설명으로 특징지을 수 있다(Achinstein, 1983). 따라서 과학교실에서 학생들을 과학적 설명 구성에 참여시키는 것은 자연 현상에 대한 더 깊은 이해로 이끄는 것이며, 특히 실제적인 과학적 실험을 경험하게 한다는 본질적인 의의를 지닌다(Braaten & Windschitl, 2011; McCain, 2015; Osborne & Patterson, 2011).

그러므로 과학적 설명이 과학교실에서 강조되어야 하는 것은 의심의 여지가 없으나, 과학교육에서는 그 의미조차 불분명하게 쓰이고 있다. 특히 Osborne & Patterson(2011)은 과학교육 연구자들 역시 자연 현상에 대한 ‘왜’ 질문에 대한 응답인 설명과 지식 주장에 대한 정당화가 목적인 논증의 개념을 혼동하며 사용하는 경우가 있음(McNeil & Krajcik, 2008; Ruiz-Primo *et al.*, 2010)을 지적했다. 미국과 호주의 개혁-기반 교육과정 문서들 역시 과학적 설명의 중요성은 강조하더라도(Australian Curriculum, Assessment and Reporting Authority, 2015; National Research Council, 2007, 2012; NGSS Lead States, 2013) 구체적으로 무엇이 좋은 과학적 설명인지, 과학적 설명을 구성하기 위한 환경을 어떻게 조성해주어야 하는지, 과학적 설명을 평가하는 기준은 무엇인지에 대한 지침이 명확하지 않다는 비판에 직면한다(Alameh *et al.*, 2023; Braaten & Windschitl, 2011). 우리나라 2022개정 과학과 교육과정(교육부, 2022)에서도 내용체계의 범주인 과정·기능에서 “결론을 도출하고, 지구와 우주 관련 상황에 적용·설명하기”(p. 11)가 제시되거나 “[6과 12-02] 지구의 자전을

알고, 낮과 밤이 생기는 이유를 설명할 수 있다.”(p. 35)와 같이 다수의 성취기준에 ‘설명’이 강조되고 있으나, 위의 개혁-기반 교육과정과 동일한 비판이 적용될 수 있다.

교육과정 문서에서 나타나듯이 과학적 설명의 중요성에 대한 인식과 대조되는 그 구체적인 방법 및 전략에 대한 낮은 관심은 교사의 수업 실행에서도 동일하게 적용되는 것으로 보인다. 교사들은 과학적 설명을 어떻게 지도해야 할지에 대한 교육학적 전략이 부재하다고 지적된다(Tang, 2021/2023). 또한 과학적 설명에 대한 교사의 지식 부족은 자신들의 수업에 과학적 설명 구성 활동을 포함시키지 않는 형태로 귀결되는 경향(Beyer & Davis, 2008; Haefner & Zembal-Saul, 2004; Zangori & Forbes, 2014)이 보고된다. Windschitl *et al.*(2008)은 과학적 설명을 구성하고 또한 무엇이 좋은 과학적 설명인지 평가하는 것은 학생뿐 아니라 교사에게도 도전적인 과업임을 강조했다.

상기 배경 아래에 서로 비슷한 시기에 몇몇 연구들은(Braaten & Windschitl, 2011; Osborne & Patterson, 2011)은 과학철학에서 논의하는 과학적 설명 모델을 바탕으로 과학교육에서 과학적 설명의 개념을 명료히 하는 작업을 발표했다. 이후 연구자들은 과학적 설명을 평가할 수 있는 분석 틀을 개발하거나(Alameh *et al.*, 2023; De Andrade *et al.*, 2019; Yao & Neumann, 2016), 과학적 설명 구성을 장려할 수 있는 교수 도식(Alameh & Abd-El-Khalick, 2018)이나 모델을 개발하여 교사의 활용 양상(Putra & Tang, 2016; Rappa & Tang, 2018; Tang, 2015)을 탐색하거나 학생들의 설명력 변화를 살펴보고(Yang & Wang, 2014), 대학생, 교사, 과학자의 설명 구성의 차이와 좋은 과학적 설명을 구분하는 준거를 탐색하는 연구(Alameh *et al.*, 2023) 등을 수행했다. 그러나 교사가 과학적 설명을 장려하는 수업 모델을 적용하고, 학생들의 설명을 평가할 도구를 갖기에 앞서 교사 스스로 자연현상에 대한 좋은 설명을 구성하는 능력을 갖추는 것이 선행되어야 할 조건일 것이다. 상기 연구들이 모두 중요한 가치를 지녔음에도 불구하고 바로 이 부분에서 과학 교육 연구는 밝혀낸 것이 거의 없다.

체계 기능 언어학(Systemic Functional Linguistics

[SFL])에서는 언어의 조직과 구조는 그 언어가 사용되는 문화 속에서의 특정한 목적과 맥락에 의해 영향을 받아 형성되고 사용된다고 본다(Halliday, 2013). 따라서 과학에서 사용되는 언어는 과학 커뮤니티의 특정한 목적을 달성하기 위한 관습화된 고유의 장르가 존재한다. 이 장르는 그 커뮤니티에서 자연스럽게 당연한 것으로 통용되기에, 그곳에 속하지 않은 사람들에게는 생소할 수 있다. 이러한 관점에서 보면 긴 시간 동안 주로 학교 사회에서만 과학을 학습한 예비교사는 과학자들이 사용하는 과학적 설명 장르에 익숙하지 않으며(Tang, 2021/2023), 또 무엇이 좋은 과학적 설명으로 받아들여지는지에 대한 기준 또한 명확하지 않기에(De Andrade *et al.*, 2019) 과학적 설명을 구성하는 것에 제약이 따를 수밖에 없을 것이다. 따라서 예비교사 교육과정에서 과학적 설명이 갖추어야 하는 형식적 논리와 좋은 과학적 설명에 대한 준거를 교육하는 것은 그들이 제시하는 자연 현상에 대한 설명 수준을 증진하기 위한 직접적이고 명시적인 전략이 될 수 있다.

상기 논의를 종합하여 본 연구는 우선 예비교사들의 설명 구성 수준을 살펴본 후 과학적 설명 구성 도구를 제공하여 자연현상에 대한 그들의 설명 수준 변화를 탐색한다. 또한 이러한 과학적 설명 구성 도구가 그들의 설명 수준 향상에 기여하는 어포던스가 무엇인지 밝히고자 한다. 이러한 시도는 예비교사로서 지녀야 할 과학적 설명 수준의 질을 높이기 위한 구체적인 함의를 제공하기 위함이며, 나아가 과학 교수 실천에서 과학적 설명 구성 수업을 장려하기 위해 교사 교육과정에서 강조되어야 할 지점을 탐색하기 위함이다.

II. 이론적 배경

1. 과학적 설명

과학철학자들은 과학적 설명을 자연 현상에 대한 관찰 가능한 기술을 넘어 어떻게 그러한 현상이 발

생하는가를 이론적으로 밝히기 위한 시도라는 것에 일반적으로 동의한다(Alameh & Abd-El-Khalick, 2018; Braaten & Windschitl, 2011; De Andrade *et al.*, 2019; Osborne & Patterson, 2011). 그럼에도 과학적 설명이 구성되는 과정에 대해서는 서로 다른 입장을 취하고 있다. 과학교육에서 과학적 설명의 의미를 명료화하기 위해 과학적 설명에 대한 과학철학자들의 다양한 입장을 살펴볼 필요가 있다. 일반적으로 과학적 설명에 대한 모형은 Hempel and Oppenheim(1948)이 연역-법칙적 모형(deductive-nomological model)을 제안한 이후, 이에 대한 비판과 대안이 제기되는 형태로 논의 및 발전되어 왔으며 대표적으로 통계-확률적(statistical-probabilistic) 모형, 인과적(causal) 모형, 실용적(pragmatic) 모형, 통합(unification) 모형 등이 있다(Woodward & Ross, 2021). 다만 본 연구는 이들 모형에 대한 방대한 논의를 담는 것이 목적이 아니기에 본 연구의 과학적 설명 구성 도구의 이론적 기반이 되는 연역-법칙적, 인과적, 통합 모형을 간단히 소개한다.

Hempel and Oppenheim(1948)이 제안한 연역-법칙적 모형은 설명될 자연 현상(피설명항)을 초기 조건과 과학 법칙 및 이론(설명항) 등을 전제로 삼아 연역적으로 추론하는 것이다. 이 모델은 피설명항이 설명항의 이론이나 법칙에 의해 연역적으로 포섭되는 형식을 갖추기에 ‘포괄 법칙 모형(covering law model)’이라고도 불린다(오피얼, 2007). 예를 들어 열기구의 상승을 이상기체 방정식의 항을 통해 연역적으로 설명한다면 이는 연역-법칙적 설명이라 할 수 있다. 이 모형이 연역적인 추론을 강조한다면 인과적 모형은 원인과 결과의 관계들을 통해 현상들 간의 인과적 상호작용을¹⁾ 설명함으로써(Salmon, 1989) 연역-법칙적 모형이 지니는 많은 문제점들을²⁾ 해결하게 된다. 만약 열기구의 상승을 기체의 분자 운동에 따른 밀도의 변화로 설명한다면 이는 인과적 모형에 기반한 접근이라 할 수 있다.³⁾ 다음으로 통합 모형은 과학적 설명은 지역적(local)이기보다 포괄적

1) 사실 인과 개념은 과학적 설명 모형의 핵심이다. 그런데 다른 과학적 모형들도 인과적인 관계를 포함할 수 있으나 인과적 모형과 같이 원인과 결과의 과정을 모형의 핵심에 두지는 않는다. 연역-법칙적 모형은 흙의 인과 개념에 기초한다. 경험주의자인 흙의 인과 개념에서 “인과 관계는 규칙성, 상관관계 혹은 법칙 아래로의 연역적 포섭”을 의미한다(김유신, 1999, p. 189). 이러한 입장은 인과 관계를 형이상학적인 것으로 보고 그것을 인간이 관념으로 연결함에 따라 인과 관계가 발생하는 것으로 본다. 그러나 실제론자들은 흙의 인과 개념에 동의하지 않는다. “수학에서 수를 정의하지 않고서도 수를 잘 사용”하는(김유신, 1999, p. 195) 것은 수라는 관념이 형성되기 전에 수가 존재하기 때문인 것처럼 실제론자들에게 인과는 자연을 작동시키는 메커니즘으로서 인간의 인식 전에 필연적으로 존재하는 것이며, 과학적 설명의 구성은 그러한 인과를 발견하는 과정으로 인식한다. 이런 측면에서 인과적 모형을 제안한 Salmon(1984)은 과학적 설명이란 현상을 세계에 원래 존재하고 있던 인과적 구조의 패턴에 맞추는 것으로 본다.

(global)이어야 한다고 본다(Friedman, 1974). 즉 개개의 자연 현상에 대한 설명은 세상에 대한 우리의 이해 증진에 기여하지 않으며, 겉으로는 상관없는 것으로 보이는 개별 현상들을 통합적으로 설명을 할 수 있을 때 세상에 대한 우리의 이해는 증대되는 것으로 여긴다. 이 입장에서 기계운동론은 이른 아침의 이슬이나 안개 발생을 설명할 수도 있고, 열기구의 상승도 설명할 수 있기에 다른 설명보다 설명력이 높은 이론이다.

한편 과학 교육에서 과학적 설명은 논증(argument)과 혼용되어 문제로 지적받고 있다(Berland & Reiser, 2009; Braaten & Windschitl, 2011; Osborne & Patterson, 2011). 설명과 논증의 본질적 차이는 인식론적 기능에 있다. 즉 설명은 현상에 대한 증대된 이해를 생성하는 것이 목적이거나 논증은 지식 주장을 정당화하거나 설득하고자 하는 것이다(Osborne & Patterson, 2011). 따라서 논증의 형식은 ‘주장-증거-추론’의 형식을 가지게 되며, 교사가 ‘이 기계가 이산화탄소라는 것을 어떻게 알았니?’, ‘그 화학작용이 발생했다는 증거는 무엇이니?’와 같은 발문을 한다면 이는 논증을 요구하는 것이 된다(Braaten & Windschitl, 2011). 반면 설명은 자료나 증거, 보장(warrants)이 아닌 현실의 이론이나 모델, 표상 등을 통해 구성된다(Osborne & Patterson, 2011). Brockriede & Ehniger (1960)에 의하면 설명과 논증은 확실성의 전개 방향이 다르게 나타난다. 즉 설명은 잘 정립된, 확실성이 높은 사실(예: 하늘은 푸르다)이 상대적으로 확실성이 부족한 설명(예: 광학 이론)으로 해석되는데 논증은 확실하지 않은 지식주장(예: 소행성의 충돌이 공룡을 멸종케 했을 것)을 정당화하기 위해 상대적으로 잘 정립된 전제(예: K-Pg 경계층에 높은 농도의 이리듐 발견, 이 시기 거대 소행성 충돌 분화구 존재)가 사용되는 것이다.

Osborne and Patterson(2011)은 설명과 논증에 대한

혼동이 야기되는 이유를 과학자들이 설명을 구성하는 일을 하기 때문이라고 본다. 즉 과학자들은 설명을 구성하기 위해 사전 지식과 전제를 끌어내는 데 이러한 것은 논증 구성을 위한 자료나 보장처럼 보일 수 있다는 것이다. 혼동의 또 다른 이유는 어떤 현상에 대한 다양한 설명이 존재할 때 각 설명들의 타당도를 정당화하는 과정에 논증이 개입되기 때문이라고 본다. 그러나 설명은 주어진 현상을 이해하기 위한 시도이나 논증은 특정 설명이 만족스러운지 그렇지 않은지에 대한 주장을 정당화하는 것에 맞춰지기에 이 둘의 담화적 특성은 구분된다.

2. 과학적 설명 구성을 위한 도구: PRO-메타언어와 좋은 과학적 설명 준거

SFL에 따르면 “장르는 문화적으로 발전되어 온 언어 사용 방식”으로 “예측 가능한 패턴이나 관습적 표현”을 의미한다(Tang, 2021/2023). 체계 기능 언어학자들은 과학 관련 글에서 현상의 근본적인 원이나 과정을 설명하는 것을 목적으로 하는 과학적 설명 장르가 있음을 발견했다(Halliday, 1993). 그러나 과학자들과 달리 교사나 학생 모두 과학적 설명 장르의 특성을 명료히 인식하지 못하기에 Tang(2015)은 메타언어에 기반하여 학생들에게 과학적 설명을 구성하는 명시적인 구조를 가르칠 것을 제안했다. 여기서 메타언어는 “언어의 기능과 구조에 관해 이야기하는 언어”로서 “언어에 대한 자기 지시적인 도구”라 할 수 있다(Tang, 2021/2023, p. 165). ‘주어’, ‘동사’, ‘절’ 등이 메타언어의 예가 된다.

Tang(2015)은 과학적 설명 생성을 위한 메타언어로 PRO, 즉 전제(premise), 추론(reasoning), 결과(outcome)라는 메타언어를 제안했다. 여기서 전제(P)는 과학적 사실, 법칙, 이론 등으로 설명의 기초가 되며 과학 커뮤니티에서 이미 받아들여지기에 설명의 맥락에서는 추가적인 정교화나 정당화가 요구되지 않

- 2) 예를 들어 연역-법칙적 모형에는 예측에서의 비대칭성 문제가 존재한다. 만약 폭풍우가 오는 이유를 기압계의 눈금이 급격히 떨어졌기 때문이라고 설명한다면 이것은 자연현상의 ‘규칙성’(기압계 눈금이 하락할 때마다 악천후가 왔었던)을 전제로 하기에 연역-법칙적 모형에서는 적절한 설명이다(이는 경험주의자 혹은 입장에서 인과적인 설명이다). 그러나 기압계 눈금이 하락했기 ‘때문에’ 악천후가 발생했다는 것은 인과적이지 않음을 직관적으로 인식할 수 있다. 기압계의 눈금 변화나 악천후는 모두 저기압에 의한 효과이기 때문이다. 이와 같이 인과모델은 연역-법칙적 모델에 대한 비판에서 등장하였다(Salmon, 1989; Woodward & Ross, 2021).
- 3) 이상기체 방정식의 항들로 열기구의 상승을 연역적으로 설명한 것을 앞서 연역-법칙적 설명의 예라 했다. 특히 이 방정식은 기체의 운동으로 야기되는 현상의 관계를 법칙으로서 기술한 것이기에 결국 인과적 모형도 연역-법칙적 모형으로 환원될 수 있는 것 아닐지 일견 의문을 제기할 수 있다. 그러나 자연 현상을 법칙과 규칙성만으로 설명하려는 연역-법칙적 모형은 부적합성, 선택 결정 문제, 과결정, 대칭성, 예측과 설명 문제 등의 비판에 직면하며(Ladyman, 2002/2003, pp. 359-364 참고), 인과적 모형은 이러한 비판에 대한 우회라 할 수 있다.

는다. 추론(R)은 인과관계, 시간관계, 비교관계 또는 조건부 접속사로 연결된 일련의 논리적 단계로 전제와 결과를 연결한다. 결과(O)는 설명되어야 할 현상을 의미한다. Putra and Tang(2016)은 PRO-메타언어를 활용한 교수 전략은 연역-법칙적 모형, 인과적 모형, 통합 모형에 기초한다고 밝힌다. 다만 전제(P)로부터 자연 현상(O)을 추론(R)하는 과정은 초기 조건과 법칙으로부터 피설명항을 연역적으로 추론하는 연역-법칙적 모형과 구조적으로 유사한 형태를 취하고 있다.

Tang과 그 동료들은 교사들의 과학적 설명 교수 전략 관점에서 PRO-메타언어 전략이 활용되는 양상을 탐색하였는데(Putra & Tang, 2016; Rappa & Tang, 2018; Tang & Rappa, 2020; Tang, 2015), 그들은 이 도구가 과학적 설명 장르가 지니는 구조를 안내하여 학습자의 설명 구성에 비계를 제공할 수 있음을 보였다. 본 연구는 이러한 장르적인 구조를 예비교사들에게 안내할 경우 그들이 구성하는 자연 현상에 대한 설명 수준을 향상시키는 데도 활용될 수 있을 것으로 예상하였다. 다만 형식적 구조와 더불어 내용적인 측면에서 과학적 설명을 구성할 때 고려해야 할 구체적인 준거가 안내된다면 자연현상에 대한 설명 수준 향상에 더 많은 도움이 될 수 있을 것으로 판단하였다.

De Andrade *et al.*(2019)은 좋은(good) 과학적 설명이 갖추어야 하는 준거를 제시했다. 이들은 우선 과학철학에서 과학적 설명 모형이 크게 인과적 모형과 통합 모형으로 구분되는 것으로 보고, 이 두 모형을 바탕으로 하는 좋은 설명의 핵심 요소를 관련성(relevance), 개념적 틀(conceptual framework), 인과성(causality), 적절한 표상 수준(appropriate level of representation)으로 정리했다. 첫 번째로 과학적 설명에는 설명되어야 할 현상과 관련되는 정보만이 제시되어야 한다. 현상과 관련되는 정보는 매우 다양할 수 있으나 그중에서 현상이 발생하게 된 이론적이고 기계론적인 설명과 관련될 수 있는 정보를 선별해야 한다. De Andrade *et al.*(2019)이 명료히 밝히지는 않았으나, 관련성은 인과적 설명을 구성할 때 고려해야 할 주요 요소(Woodward & Ross, 2021)로 지적된다. 두 번째로 과학적 설명은 과학의 이론에 기반한 개념적 틀을 제공할 수 있어야 한다. 이는 과학은 지엽적으로만 인정되는 이해가 아니라 포괄적이며 근본적인 이론이나 모델 등, 즉 ‘big ideas’에 기반하

여 자연현상을 설명할 수 있어야 한다는 설명의 통합 모형에 기반한 준거이다. 세 번째로 과학적 설명은 현상의 기저에 작용하는 논리적이고 응집성 있는 인과적 관계를 제시할 수 있어야 한다. 이때 인과적인 관계는 선형적일 수 있으나 대다수 자연 현상은 복잡적이며, 그 관계가 표면적으로 명료히 드러나지 않을 수도 있다. 네 번째로 좋은 과학적 설명은 적절한 수준의 표상을 요구한다. 특히 자연 현상을 인과적으로 설명하기 위해서는 표면적이고 거시적인 현상을 추상적이고 미시적인 표상 수준에서 해석할 수 있어야 한다.

PRO-메타언어(Tang, 2015)가 연역-법칙적 모형의 형식적인 구조를 더 명료히 반영하더라도 두 연구는 교육적인 범용성을 고려하여 복수의 과학적 설명 모형에 기반을 두는 것으로 보인다. 시론적 성격으로서 본 연구 역시 특정 과학적 설명 모형에 초점을 두기보다는 예비교사 교육이라는 포괄적인 목적에 맞추어 Tang(2015)과 De Andrade *et al.*(2019)의 연구를 형식과 내용 측면에서 종합 및 적용하고자 한다.

그에 따라 본 연구는 형식적 구조 측면에서는 PRO-메타언어가, 내용 구성 준거 측면에서는 좋은 설명의 핵심 요소가 상호보완적으로 활용될 때 과학적 설명 구성을 안내하는 훌륭한 도구가 될 것으로 가정한다. 특히 이 두 전략은 잠정적으로 다음과 같이 대응될 수 있을 것이다(Table 1). 우선 자연 현상을 이해하기 위한 전제(P)로서 현상을 포괄적으로 설명할 수 있는 개념적 틀이 제시되어야 한다. 이 틀을 바탕으로 다양한 정보(사건, 개체, 특성, 기능 등) 중 이 현상을 이해하는 데 핵심이 되는 정보를 선별하여 미시적인 수준에서 거시적으로 일어나고 있는 현상을 인과적으로 설명할 수 있어야 한다. 이는 추론 단계(R)에 해당된다. 결과 단계(O)에서는 관찰 가능한 현상, 즉 설명되어야 할 현상을 진술하게 되는 것이므로 대응되는 내용 구성 준거는 없다. Braaten and Windschitl(2011)과 Alameh *et al.*(2023)

Table 1. Scientific explanation construction tool

Genre structure of scientific explanation	Criteria for scientific explanation content
Premise	Conceptual framework
Reasoning	Relevance Appropriate level of representation Causality
Outcome	Not applicable

는 과학적 설명 구성 및 그에 대한 평가에서 어떤 현상이 일어났는지에 대한 진술인 ‘What’과 어떻게/왜 그 현상이 일어났는지에 대한 진술인 ‘Why’에 대한 응답을 핵심 요소로 보았는데, 전제(P)와 추론(R) 단계는 ‘Why’ 질문에 대한 진술이며 결과(O)는 ‘What’에 대한 진술이 된다. 이를 통해 이 도구는 예비교사가 자연 현상을 설명하기 위해 현상 기저에 인과적으로 존재하는 관계에 집중하며, 또한 과학적 이론이나 모델 등을 통해 그 현상이 어떻게, 왜 일어났는지 설명할 수 있도록 비계를 제공하는 것에 초점을 둔다.

위 논의에 기초하여 본 연구는 구체적으로 다음과 같은 연구 문제를 탐색한다. 과학적 설명 구성 도구(PRO-메타언어와 좋은 과학적 설명의 핵심 요소)의 활용으로 초등 예비교사들의 설명 수준은 어떻게 변화하는가? 과학적 설명 구성 도구가 예비교사들의 설명 수준 향상에 미치는 어포던스는 무엇인가?

III. 연구 방법

1. 연구의 맥락 및 자료 수집

이 연구의 참여자는 2023학년도에 1저자가 지도했던 ‘초등과학교육론’ 강좌를 수강한 A 교육대학교 3학년 학생(비과학교육 심화전공) 24명이다. 연구자는 이들에게 연구의 목적과 절차, 권리 등에 대해 안내하였으며, 예비교사들은 자발적으로 연구 참여에 동의하였다. 연구참여자는 해당 강좌를 듣기 전에 공통적으로 화학교육 전공자가 지도한 ‘초등과학 탐구 교육’ 강좌를 들었으며, ‘자연과학의 이해’, ‘현대과학의 이해’ 등 최소 한 강좌 이상의 내용학 강좌도 이수하였다고 응답했다. 이 연구는 본 강좌의 두 번째 주에 일회적으로 수행되었기에 강좌의 전반적인 운영이 연구참여자의 과학적 설명 수준에 미친 영향은 없는 것으로 추정할 수 있다.

연구참여자들의 활동 절차 및 그에 따른 수집 자료는 다음과 같다. 첫째, 연구자는 예비교사들에게 사진과 함께 냉장고에서 방금 꺼낸 물병의 표면에 물방울이 맺힌 상황을 제시하고 이러한 현상이 생긴 까닭을 글과 그림으로 각각 설명할 것을 요구했다. 이는 질문지를 통해 제공했으며 연구참여자는 어떠한 자료도 참고하지 않고 개인적으로 질문에 응답해야 했다. 이 연구는 문자로 표현된 과학적 설명을 평가하는 것이 목적이거나 그림으로도 설명할 것을 요

구한 까닭은 문자와 그림은 설명 생성 시 서로 다른 어포던스를 유발하기에(장진아 등, 2023) 문자로 된 설명을 보조할 수단으로 그림을 그릴 것을 요구했다. 따라서 자료 분석 단계에서 그림은 예비교사들의 글에 대한 연구자의 분석 타당도를 높이기 위한 목적으로만 활용되었다. 한편 물의 상변화를 주제로 선택한 까닭은 이 현상이 지구과학과 물리, 화학 단원에서 모두 다루는 주요 개념이기에 예비교사들이 익숙할 것이라 판단했으며, 기체운동론에 기초하는 설명은 연역-법칙적 모형, 인과적 모형, 통합 모형을 모두 만족할 수 있기 때문이다.

둘째, 연구자는 과학적 설명 구성을 위한 도구로 PRO-메타언어와 좋은 설명을 위한 핵심 요소를 제시했다. 강좌에서는 발음의 편의를 위해 PRO와 2C2R (Conceptual framework, Causality, Relevance, appropriate level of Representation의 약자)로 지칭했다. 연구자는 PRO-메타언어 전략 사용의 예시로 Tang(2021/2023, p. 169)을 제시했다. 이 사례는 그림자가 생기는 이유를 PRO 구조로 설명한다. 좋은 설명을 위한 핵심 요소의 예시로는 PRO-메타언어 측면에서 제시된 Tang(2015, p. 4)의 “왜 고체는 고정된 모양과 부피를 가지는가” 사례를 2C2R 측면에서 교수자가 먼저 해석한 후 예비교사들이 둘을 비교하면서 이해하도록 했다(Table 2: 예비교사에게 제시한 자료, 단 한글로 제시함). 이어 두 전략을 종합하여 하나의 과학적 설명 구성 도구로서 제시하며(Table 1) 예비교사들은 교수자와 함께 ‘부레옥잠이 물에 뜰 수 있는 이유’를 부레옥잠의 구조와 부력 측면에서 설명하는 활동을 수행하였다. 이 주제를 선택한 까닭은 교수적 처치가 사후 과제에 미치는 영향을 최소화하기 위함이었다.

셋째, 예비교사들은 수증기의 응결에 대한 설명을 요구하는 처음과 동일한 질문지를 받았으며 과학적 설명 구성 도구(Table 1)를 고려하여 현상에 대한 설명을 다시 글과 그림으로 작성하였다. 이때 연구참여자들은 위 두 번째 단계에서 교수자가 강의한 슬라이드 자료를 확인할 수 있었다. 이어서 자기 반성적 질문지로서 사전 질문지와 비교하여 사후 질문지에서 자신의 설명이 달라진 부분이 무엇인지 간략히 밝히고, 그렇게 바꾼 까닭이 무엇인지 작성하였다. 또한 과학적 설명 구성 도구가 이 자연 현상을 설명하는 데 도움이 된 점이 있다면 그게 무엇인지 기술하였다. 이는 이 도구가 사용자에게 어떠한 행

Table 2. Apply the Pro structure and Key Elements of a Good Explanation to the same example. The example is from Tang (2015, p. 4)

PRO structure	Example	2C2R components
Premise	There are attractive and repulsive forces that hold the molecules in the solid in fixed position.	Conceptual framework: intermolecular forces
Reasoning	The strong attractive forces prevent the molecules from leaving their positions, while the repulsive forces, which act when they are too close together, prevent them from collapsing. Thus, the molecules can only vibrate about their fixed positions and they are held together in a regular pattern.	Relevance: Use only information related to intermolecular distances necessary for understanding the phenomenon Causality: Present intermolecular attractive and repulsive forces as the underlying cause of the phenomenon Appropriate level of representation: Account for the macroscopic phenomenon through microscopic (molecular-level) analysis.
Outcome	Therefore, a solid has fixed shape and volume.	Not applicable

위를 유발할 수 있는지(어포던스)를 밝히기 위한 자료로 활용되었다. 한편 연구자는 예비교사들에게 사전 및 사후 응답에 달라진 것이 없다면 왜 없는지에 대해서도 서술할 것을 요구하였으나, 모든 연구참여자의 응답이 달라졌기에 이에 대한 응답은 수집되지 않았다.

2. 자료 분석

예비교사들의 사전 및 사후 응답에 대한 설명 수준을 판별하기 위해 De Andrade *et al.*(2019)이 제안한 설명 수준 분석 체계를 일부 변형했다(Fig. 1의 이탤릭체는 본 연구에서 추가 및 변형된 부분). De Andrade *et al.*(2019)은 과학철학자들이 인식하는 과학적 설명 모형과 8학년 학생들의 자연 현상에 대한 설명 양상을 바탕으로 설명 수준을 크게 네 수준(세부 여섯 단계)으로 제시했다. 그러나 이들과 달리 연구참여자의 응답을 사전, 사후에 걸쳐 2회 수집한 본 연구는 설명 수준을 크게 네 수준으로 나누는 것은 동일하나 세부 수준을 일곱 단계로 나누었다. 또한 본 연구는 예비교사에게 PRO-메타언어 사용을 명시적으로 요구하므로, De Andrade *et al.*(2019)의 설명 수준 분석 체계에 더하여 예비교사가 개념적 틀(PRO의 P에 해당)을 명시적인 문장으로서 드러내는지 여부를 1, 2 수준과 3, 4 수준을 구분하는 주요한 기준으로 삼았다.

먼저 1수준은 비설명(non-explanation)으로 설명하려는 현상과 상관없는 정보(사건, 개체, 특성 등)를 사용하는 경우 혹은 현상을 설명하기에 부적절한 이론이나 모델 등에 근거하는 경우가 해당된다. 또한 문제에서 주어진 현상을 재진술하여 새롭게 제시된

정보가 없는 경우도 비설명에 해당된다. 예를 들어 수증기 포화에 의한 응결 현상을 용해로 진술한 사례는 현상을 설명하기에 부적절한 개념에 근거하기에 비설명으로 분류된다.

2수준은 기술(description)⁴⁾로 현상에 선행하는 사건을 기술하나 이러한 사건이 현상을 이끌어내는 데 어떻게 관련되는지에 대한 개념적 틀을 명시적으로 밝히지 못한다. 특히 이 단계는 현상의 원인을 설명하는 ‘왜’에 대한 진술이 포함되지 않고 현상 자체를 기술하는 ‘무엇’에 대한 진술만 포함된 것이 특징이다. 2a 거시 기술(macro-description) 수준은 온도와 같이 현상과 관련된 기능, 속성 등을 언급하나, 온도가 현상에 어떠한 영향을 주는지 밝히지 못한다. 2b 혼합 기술(mix-description) 수준은 공기 중 수증기와 같은 미시적 개체를 언급하나, 역시 현상을 이해하는 데 인과적으로 활용되지 못한다. 2수준의 예시로 ‘차가운 물병의 표면에 따뜻한 공기가 닿으면 물방울이 생긴다.’라는 진술은 명시적인 개념적 틀이 드러나지 않았으며, 일상적인 용어(“차가운”)로 거시적인 상황을 기술할 뿐 현상을 이해하기 위한 인과적인 관계는 부재하므로 2a로 평가되는 사례이다.

3수준 연관된 설명(associative explanation)은 현상을 이끌어내는 개념적 틀을 명시적으로 서술하고 그에 따라 인과 관계를 밝힌다. 그러나 현상을 설명하기 위한 논리적 관계(logical chain of relations)는 여전히 명료하지 못하다. De Andrade *et al.*(2019)과 달리 본 연구는 예비교사의 응답에 기초하여 3a 거시 연관적(macro-associative), 3b 혼합 연관적(mix-associative) 설명으로 구분했다. 3a는 온도와 같이 거시적 속성을 현상을 변화시키는 원인으로 밝히며 3b

4) De Andrade *et al.*(2019)은 기술적 설명(descriptive explanation)이라고 지칭했으나 ‘무엇’에 대한 진술(기술)은 ‘왜’에 대한 진술(설명)과 분명히 구분되어야 하기에 본 연구에서는 ‘기술’로 칭하였다.

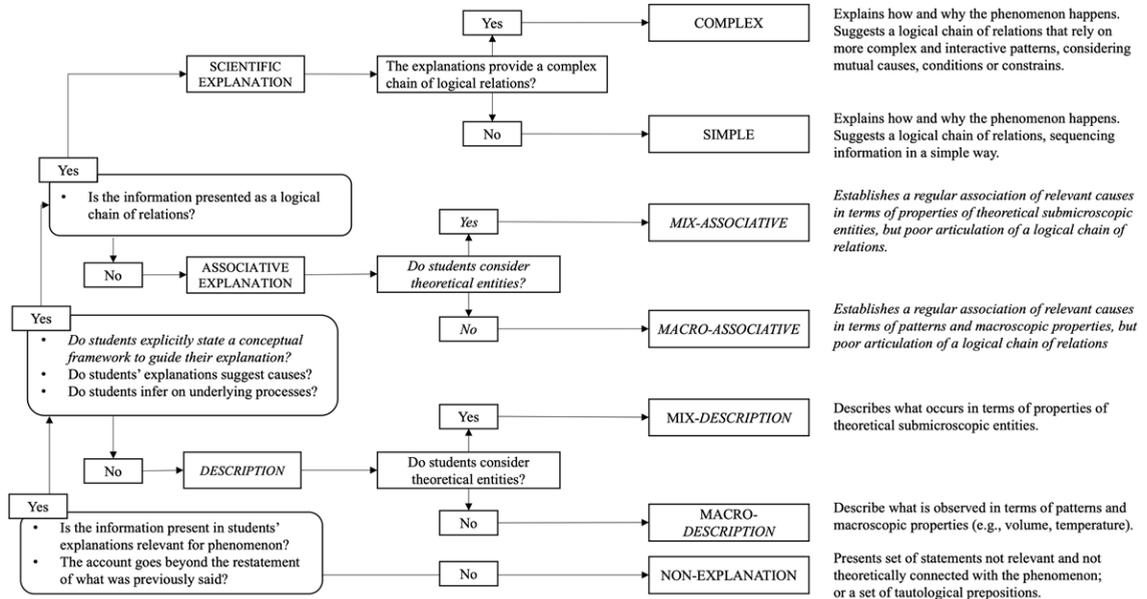


Fig. 1. The system of analysis for categorizing participants' answers: Adapted from De Andrade *et al.* (2019). The italicized text represents additions and modifications made in this study

는 온도에 따른 물 분자의 운동이나 분자 간 거리와 같이 미시적 특성을 바탕으로 거시적 현상의 원인을 진술한다. 그러나 수증기 포화에 대한 개념 없이 분자 운동이나 분자 간 거리만 설명할 경우 물의 끓음이나 액화, 응해, 응고, 증발 등도 포함하는 진술이기에 물병 주변 공기가 포화된 상태에서의 응결 현상을 타당하게 설명할 수 없다. 이런 점에서 3수준은 정보들이 논리적 사슬로 긴밀히 연계되어 있지 못하며, 따라서 여전히 과학적 설명 수준이 될 수 없다. 예를 들어 예비교사 M4는 “온도가 낮아지면 공기 중의 수증기가 응축된다. 냉장고에서 방금 꺼낸 물병은 표면이 차갑다. 따라서 표면 주위에 있는 수증기가 응축된다.”라고 작성했다. 우선 온도와 수증기 응결 사이의 규칙성을 개념적 틀로 명료히 제시했다는 점에서 2수준의 진술과 구분된다. 다만 냉각된 공기와 수증기 응결 사이의 패턴이 발생하는 인과적인 원인(포화수증기압 혹은 수증기 포화와 관련하여)을 밝히지 못하기에 4수준이 될 수 없다. 또한 분자 운동이나 분자 간 거리에 대한 설명(3b) 없이 온도라는 거시적인 속성으로만 현상을 설명하기에 3a 수준이 된다.

4수준은 과학적 설명(scientific explanation) 수준이다. 과학적 설명은 현상을 포괄적이며 논리적으로 설명할 수 있는 개념적 틀이 제시되어야 하고, 또한

적절한 표상 수준에서 현상이 어떻게, 왜 일어나는지에 대한 타당한 해석이 포함되어야 한다. 4a 단순한(simple) 과학적 설명과 4b 복합적(complex) 과학적 설명을 구분하는 기준은 서로 상호작용하는 사건, 개체, 속성 사이의 복합적 관계가 밝혀졌는가의 여부이다. 즉 문제에서 주어진 응결 현상을 단순히 온도에 따른 포화 수증기압의 변화 패턴만으로 설명하는 것은 4a 수준으로, 포화 수증기압의 개념에 대한 복합적인 이해(예: 닫힌계에서 포화수증기압은 증발과 응결이 평형을 이루는 상태에서 수증기 분자들의 운동에 의해 가해진 압력이며, 그 계의 온도에 따라 달라짐)를 바탕으로 인과적으로 현상을 해석하는 것은 4b 수준으로 구분하였다. 다만 본 연구에서는 4b 수준의 응답이 없었다.

분석 과정은 다음과 같다. 우선 De Andrade *et al.* (2019)의 설명력 분석 체계를 수정 없이 적용하여 두 연구자가 별도로 예비교사의 사전, 사후 응답을 수차례 검토하였다. 그러나 예비교사의 응답은 이 분석 체계를 그대로 적용할 때 타당하게 구분될 수 없었기에 1저자가 주도적으로 설명 체계를 변형하였으며, 이 과정에서 지구과학교육, 화학교육, 물리교육 전공 박사 4인이 참여하여 분석 체계에 대한 타당도를 검증하였다. 새롭게 변형된 분석 체계를 바탕으로 다시 두 연구자가 원자료를 분석하여 높은 일

치에 도달하였으며(Cohen’s weighted kappa: .896, $p < .001$), 제기된 이견은 다시 토의를 통해 합의에 도달하였다. 예비교사의 설명 수준은 사전, 사후에 빈도별로 누계하여 전체에 대한 비율을 비교하였으며, 사전-사후 설명의 변화를 유형별로 분류하였다.

과학적 설명 구성 도구가 예비교사들의 설명 수준 변화와 관련하여 어떠한 어포던스를 지니는가를 분석한 절차는 다음과 같다. 우선 1저자가 1차적으로 모든 연구참여자의 사전 및 사후 응답 및 자기 반성적 응답지를 모두 검토하며 떠오르는 내용을 메모하며 예비 분석을 하였다. 이어서 앞선 사전 및 사후 응답의 설명 수준 분석 결과에 준해 과학적 설명 구성 도구가 예비교사들의 설명 수준 변화에 어떠한 영향을 미쳤는지를 중심으로 개방 코딩과 범주화를 했다. 이때 본 연구에서 제시된 PRO와 2C2R 요소가 사전과 사후에 얼마나 포함되어 있는지, 어떻게 변화되었는지가 분석의 중심이 되었다. 만약 예비교사의 사후 응답에서 미시적 수준에서의 표상이 새롭게 추가되었다면 그 까닭을 연구참여자의 자기 반성적 응답지를 통해 탐색하였다. 이는 자기 반성적 응답지에서 사전에 비해 사후에 추가된 내용을 밝히고 그 이유를 제시하도록 요구했기에 가능하였다. 끝으로 생성된 범주 간, 범주와 코드 간의 비교를 통해 공통점과 차이점을 찾으며 구조화된 범주들이 나올 때까지 이 과정을 지속하였으며(Glaser & Strauss, 1967), 각 범주를 대표할 수 있는 테마를 도출하였다. 생성된 테마에 대해 연구자는 여러 자료에서 해당 테마가 명확히 드러나는지, 해당 테마가 중첩되지 않고 구별되는지, 혹은 어떤 연관이 있는지, 일관성을 유지하는지 등을 점검했다(Braun & Clarke, 2016). 1저자의 분석에 대해 교신저자가 모든 원자료를 검토하였으며, 추가로 제기되는 이견에 대해서는 토의를 통해 합의에 도달했다. 이 같은 과정을 통해 과학적 설명 구성 도구가 예비교사의 설명 수준 향상에 기여하는 어포던스는 세 가지 도출되었으며, 이에 대조되는 본 도구의 한계도 도출되었다. 다만 이 한계는 역설적으로 예비교사 교육 측면에서 어포던스가 될 수 있다는 판단 아래 토의 절에서 새롭게 조명하였다.

연구 결과는 응결 현상에 대한 예비교사의 설명 수준 변화, 이 도구의 어포던스 순으로 제시한다. 또한 연구참여자의 익명성을 보장하기 위해 설명 수준의 상승(Rise), 유지(Maintain)를 뜻하는 R/M에 무작위로 배정한 번호를 조합하여 R1, R2, M1, M2 식으로

개별 예비교사를 지칭하였다.

IV. 연구 결과

1. 응결 현상에 대한 예비교사의 설명 수준 변화

포화 상태에서의 응결 현상에 대한 사전 및 사후 설명 구성에서 24명의 예비교사는 Fig. 2와 같은 경향을 나타냈다. 우선 사전 응답에서는 3명의 예비교사는 1수준, 즉 이 현상을 부적절한 이론에 근거하여 기술하고, 특별한 개념적 틀 없이 문제에서 주어진 현상을 재진술하는 수준의 응답을 제시했다. 전체의 71%(17명)에 이르는 예비교사는 2수준에 머물렀는데, 대다수의 예비교사들은 현상의 원인을 설명하기 위한 개념적 틀을 명시적으로 제시하지 못했기 때문이다. 상대적으로 과학적 설명과 연관되거나 여전히 현상을 논리적으로 설명할 수 없는 3수준이 3명이었으며, 1명만이 과학적 수준에서 응답하였다. 이러한 결과는 예비교사가 자연 현상에 대한 과학적 설명을 구성할 능력이 사실상 없음을 의미한다. 그러나 사후 응답에서 예비교사의 전반적인 설명 수준은 증대되었다. 1수준(비설명)은 1명만 줄어 큰 차이가 없었으나 71%(17명)의 예비교사가 3수준(연관된 설명)의 응답을 했으며, 2수준(기술)의 응답은 8%(2명)로 크게 감소했다. 가장 높은 4수준(과학적 설명)도 사전에 비해 두 명 증가한 것으로 나타났다. 다만 4b수준의 응답은 사전, 사후 모두 없었다.

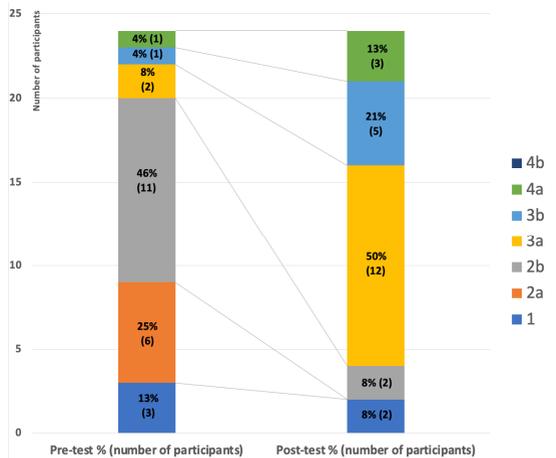


Fig. 2. Changes in the levels of pre- and post-explanation

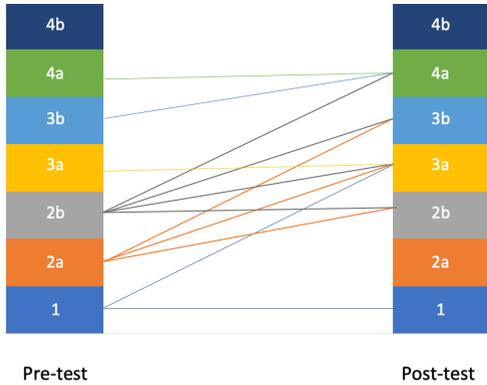


Fig. 3. Trajectory of changes in pre- and post-explanation levels

Fig. 3는 예비교사들의 사전-사후 설명 수준의 변화 경로를 나타낸다(단 각 경로별 예비교사 수는 표현되지 않음). 위 Fig. 2에서 드러난 2수준(사전 17명, 사후 2명)과 3수준(사전 3명, 사후 17명)의 변화는 Fig. 3에서 보듯이 사전 2수준 응답자 중 상당수가 사후 3수준으로 상승한 것에 기인한다. 한편 사전 대비 사후 4수준으로의 증가(1명 → 3명)는 각각 사전 2b, 3b 수준 응답의 상승에 의한 것이다. 또한 사전 1수준의 예비교사 중 1명만 3수준으로 이동했고 나머지 2명은 1수준에 그대로 머물렀다. 이를 종합하면 전체 24명 중 18명(67%)의 예비교사는 설명 수준의 상승, 6명(33%)의 예비교사는 설명 수준이 유지되었으며, 설명 수준이 하락된 사례는 없었다.

다음은 예비교사의 설명 수준 변화를 나타내는 대표적인 사례들이며, 우선 설명 수준 2a에서 3a로 상승한 경우로 예비교사 R1의 사전, 사후 응답이다.

[R1, 사전 2a]
차가운 곳에 있던 물병이 냉장고보다 온도가 높은 실온에 놓이면서 비교적 따뜻한 공기가 물병의 차가운 표면과 만나 물이 발생한다.

[R1, 사후 3a]
수증기는 온도 변화에 따라 형태가 달라진다. 수증기가 차가운 물체를 만나면 액체가 되고 이를 응결이라고 한다. 냉장고에서 방금 꺼낸 물병의 표면 온도는 상온보다 낮기에 상온의 수증기가 물병을 만나면 응결한다. 따라서 냉장고에서 방금 꺼낸 물병의 표면에 물방울이 맺히게 된다.

예비교사 R1은 사전 응답으로 별도의 개념적 틀(혹은 전체 P)을 제시하지 않았으며, 물병이 온도가

다른 곳에 “놓이면서 ... 물이 발생”하는 것으로 현상을 기술하였다. 응결현상을 설명하기 위해 온도를 언급하기는 했으나, 온도를 이 현상을 발생시키는 주요 속성으로 내세우고 그 속성의 변화가 어떤 현상을 야기할 수 있는지를 밝히기보다는 물병이 위치하는 곳의 온도가 달라진 상황만을 기술하고 있다. 압 목적으로 이 예비교사가 온도를 주요 속성으로 상정하였더라도 사전 응답은 일상적인 발화에 가까우며 분석적이고 관계적인 과학적 설명의 특징을 지니지 못하고 있다. 그러나 사후 응답에서 이 예비교사는 전제가 되는 문장(첫째 문장, 둘째 문장)에서 개념적 틀로 물의 상변화에 영향을 미치는 변인으로 온도를 명료하게 밝힌 후에 사전 응답에 제시하지 않았던 개념인 “응결”을 제시하였다. 다만 전제가 되는 문장에는 여전히 온도 변화가 물의 상변화를 일으키는 이유에 대한 논리적인 간극이 크게 존재하기에 과학적인 설명이 될 수는 없다. 다음은 사전 3b수준에서 사후 4a로 상승한 예비교사 R17의 사례이다.

[R17, 사전 3b]
냉장고에서 방금 꺼낸 물병의 온도는 주변 공기 온도보다 낮다. 때문에 물병과 가까운 공기들은 냉각되고, 공기 안에 있던 수분들이 포화상태가 되어 물병의 표면에서 응결하게 된다. (공기의 온도가 낮아질수록, 포화수증기량이 적어진다).

[R17, 사후 4a]
공기 내의 수증기량이 포화수증기량을 넘을 시 응결되는데 이 포화수증기량은 공기의 온도에 영향을 받는다. 공기의 온도가 올라갈수록 포화수증기량도 커진다. 냉장고에서 방금 꺼낸 물병의 온도는 실온 공기 중의 온도보다 낮기 때문에 물병 주위의 공기들이 냉각되게 된다(온도↓). 이 과정에서 공기가 담을 수 있는 포화수증기량이 줄어들고 현재 수증기량이 포화수증기량보다 커진다면 초과한 만큼의 수증기가 물병의 표면에서 응결된다.

예비교사 R17은 사전 응답의 마지막 문장에 괄호 안에 공기의 온도와 포화수증기량의 관계를 명시적으로 기술했다. 그러나 이 개념적 틀은 두 변수 간의 관계를 나타내더라도 수증기가 응결하는 까닭을 설명하지 못하였다. 즉 논리적 연결 사슬이 존재하지 않는다. 그러나 사후 응답에서 이 개념적 틀은 “공기 내의 수증기량이 포화수증기량을 넘을 시 응결”되는 것으로 더 정교화되었으며, 그에 따라 마지막 문장의 진술이 논리적으로 연역될 수 있었다. 그러나 앞서 자료 분석 절에서 언급했듯이 포화수증기압(량) 이상의 수증기는 응결된다는 식의 단순 관계적 서술

은 포화수증기압에 대한 복합적인 이해와 이를 바탕으로 하는 인과적 기제를 드러내지 않기에 4a수준(단순한 과학적 설명)에 머문다.

다음으로 설명 수준이 유지된 예비교사는 6명으로 전체의 24%를 차지했다. 1, 2b, 3a, 3b 수준에서 사전-사후에 동일한 수준의 응답이 나타났다. 특히 두 명의 예비교사가 1수준에 머물렀는데, 다음은 그중 M1 예비교사의 응답이다.

[M1, 사전 1]

물병이 차가운 공간에서(냉장고) 더 따뜻한 공간으로 나와 물병은 차갑고 공기는 따뜻해서 물방울이 응결되었다.

[M1, 사후 1]

물병의 온도가 냉장고 밖 온도와 같아졌다.

어떤 물체의 열에너지는 주위의 열에너지와 같아지려고 한다. 열에너지가 이동하는 과정에서 물병에 물방울이 생겼다.

M1 예비교사의 사전 응답은 문제에서 제시한 상황을 재진술한 형태이다. 설령 예비교사가 온도를 이 현상을 일으키는 주요 변인으로 암묵적으로 설정하였더라도 온도와 같은 거시적인 속성에 대한 진술이 명시적으로 드러나지 않은 일상적인 진술이다. 사후 응답에서는 열적평형을 새롭게 개념적 틀로 제시하였는데, 이는 물병 표면의 응결 현상을 이해하기 위한 타당한 이론이 아니며, “물병의 온도가 냉장고 밖 온도와 같아”진 상태에서는 문제 상황과 같은 응결 현상이 일어날 수 없기에 현상을 타당하게 설명하는 개념적 틀이라 할 수 없다. 따라서 개념적 틀의 형태가 명시적으로 드러났더라도 여전히 1수준으로 평가되었다. 아울러 사후 두 번째 문장의 “물체의 열에너지”라는 표현은 주어진 자료에서 명료하진 않으나 이전 문장에 비추어 볼 때 ‘물체의 온도가 같아지려 한다’를 의도한 것으로 보이는데, 이와 같이 열(heat), 열적(thermal) 에너지, 온도 등의 개념에 대한 혼란은 다양한 연령대에서 나타나는 것으로 보고되며 교과서의 설명 또한 학생들의 혼란을 부추기는 것으로 분석된 바 있다(백성혜 & 박영주, 2002).

2. 과학적 설명 구성 도구의 어포던스

수증기 포화에 의한 응결 현상에 대한 예비교사들의 설명 수준 변화에 근거해 이 연구에서 제시한 과학적 설명 구성 도구의 어포던스를 분석할 수 있다. 이 도구는 개념적 틀을 정립하고 논리적 설명과 미시적 해석을 유발하는 등의 긍정적인 영향을

미치는 것으로 나타났다. 또한 현상을 설명하기 위한 적절한 개념적 틀을 지니지 못할 경우 오히려 예비교사의 오개념을 뚜렷이 드러내게 하는 어포던스도 지니는 것으로 나타났다.

우선 이 도구가 가장 광범위한 예비교사에게 영향을 미쳤던 어포던스는 현상을 설명하기 위한 개념적 틀을 정립하도록 유도한다는 점이었다. 1수준과 2수준의 응답은 공통적으로 현상을 이해하기 위한 개념적 틀이 부재하다는 공통점을 지닌다. 전체 24명의 예비교사 중 무려 20명은 사전 응답에서 개념적 틀을 제시하지 않고 현상을 설명하려 했기에 1, 2수준으로 분류되었다. 그러나 사후 응답에서 이들 중 16명은 개념적 틀을 제시했기에 3a 이상의 수준으로 상승할 수 있었다(앞선 R1 예비교사의 사례 참고). 현상을 이해하기 위한 법칙이나 이론 등을 제시하는 것은 연역적인 추론을 강조하는 연역-법칙적 모형이나 포괄적이고 통합적인 이론을 강조하는 통합 모형의 핵심이라는 점에서 예비교사들은 설명 수준의 의미 있는 상승을 이뤘다고 할 수 있다. 실제 예비교사들의 자기 반성적 응답에서 R2(2b→3a) 예비교사는 이 도구가 “좀 더 명확한 근거나 원리를 반영하여 과학적 설명을 전달할 수 있도록 하였다”고 응답했으며, R9(2a→3b) 예비교사는 “논리적인 틀이 생겨 내가 알고 있는 지식을 응용할 수 있었다”고 기술했는데, 이러한 응답은 이 도구가 현상을 설명하기 위한 개념적 틀을 정립하도록 명시적으로 인지시키는 어포던스가 있음을 지지한다.

두 번째 어포던스는 이 도구가 설명의 논리성을 유발한다는 점이다. 이것은 위 첫 번째 어포던스와 관련되는 것으로서 예비교사들은 PRO의 흐름에 맞추어 먼저 개념적 틀을 정립함으로써 이어지는 추론을 연역적으로 도출하거나 인과적으로 설명할 수 있었고 따라서 논리적이고 체계적인 측면에서 설명 수준이 강화되었다. 다음은 R3 예비교사의 서술이다.

[R3, 사전 2b]

물병의 내부 온도와 바깥의 온도의 차이가 발생해서 물병 주변에 있던 기체가 액체가 되어 물병의 표면에 물방울이 맺혔다. 온도가 더 높은 바깥의 분자가 온도가 낮은 물병 쪽으로 이동하면서 기체 상태에서 액체 상태로 변화했다.

[R3, 사후 3a]

P 두 공간 간의 온도 차이가 발생하면 수증기가 응결하여 액체 상태가 된다.

R 응결은 기체 분자가 온도 변화를 맞이했을 때 발생한다.

따라서 물병의 낮은 온도를 만난 기체 분자는 응결하여 액체 상태가 된다.

○ 그러므로 온도차에 의해 물병의 표면에 물방울이 생긴다.

사전 응답에서 두 번째 문장은 의미 관계 측면에서 첫 번째 문장에 대한 부연 설명이나 첫 번째 문장에 추가적인 설명력을 더하지 않는다. 그에 비해 예비교사가 직접 붙인 ‘PRO’ 두문자에 따라 서술된 사후 응답에서 추론(R)의 두 번째 문장은 앞선 두 문장으로부터 연역적으로 도출되며 그에 따라 인과적 의미 관계 접촉사인 ‘따라서’가 추가되었음을 알 수 있다. 해당 예비교사는 자기 반성적 응답에서 “PRO 전략으로 설명하기 위해서는 과학적 논리성과 인과 관계가 포함된 진술이 추가되어야 하기 때문에 반영”했다고 진술했는데, 이는 예비교사 스스로도 이 도구가 현상에 대한 설명에 논리성을 부여한다고 인식했음을 보여준다. 다만 예비교사의 사후 응답이 3a(연관적 설명)에 머문 것이 보여주듯이 이 자체가 과학적 설명을 담보해주지는 못하였다. 이는 PRO가 근거를 두고 있는 연역-법칙적 모형의 특성에서 기인한다고 할 수 있다. 즉 앞선 주석 2)에서 보였듯이 연역-법칙적 모형은 초기조건과 과학법칙 및 이론으로부터의 연역적인 추론만 보장하지, 인과적인 추론을 보장하지 않기 때문에 논리적인 오류가 없더라도 자연 현상에 대한 충분한 설명력을 보여주지 못할 수 있다. 마찬가지로 이 R3 예비교사 사례는 논리성을 갖추었다는 것 자체가 과학적인 설명을 이끄는 것은 아님을 보여준다.

세 번째 어포던스는 미시적 관점의 유발이다. 좋은 설명의 핵심적 요소 중 하나로 적절한 수준의 표상이 강조되었는데, 이는 예비교사들이 사후에 설명을 수증기 분자 수준에서 정교화하도록 자극한 것으로 분석된다. 다음은 R8 예비교사의 글이다.

[R8, 사전 2a]

물병 안의 물의 온도와 물병 바깥의(냉장고 밖) 온도 차이로 인해 생기는 현상입니다.

냉장고 바깥의 온도는 냉장고 안 온도, 즉 물의 온도보다 높습니다.

차가운 물에 상온의 공기가 닿으면서 물방울이 맺히는 것입니다.

[R8, 사후 3b]

온도가 낮을수록 물 분자는 모이고, 온도가 높을수록 물 분자의 활동이 활발해진다.

상대적으로 온도가 높은 공기 중의 물 분자가 모이지 않고

떠돌아다니다가 온도가 낮은 물병에 닿으면서 활동이 둔해진다. 이렇게 물 분자들이 모여 물방울을 생성한다.

그러므로 냉장고에서 방금 꺼낸 물병의 표면에는 물방울이 맺힌다.

사전 응답에서 이 예비교사는 물방울의 응결은 “상온의 공기가 닿으면서” 생기는 것으로서 거시적 수준에서만 현상을 설명하고자 하였다. 그러나 사후 응답에서 온도에 따른 물 분자 간의 거리 혹은 분자 활동에 대해 관계를 전제하고, 낮은 온도에서 활동이 둔해진 물 분자는 물방울을 생성하는 것으로 설명했다. 일반적으로 3a 수준의 진술은 온도에 따른 상변화의 관계만을 설명하는데, 이 예비교사는 미시적인 관점에서 설명하려고 시도함으로써 ‘온도’와 ‘물의 상변화’ 관계 사이에 분자의 운동 및 분자 간 거리를 진술하였고, 그에 따라 인과적으로 두 관계를 연결할 수 있었던 것으로 해석된다. 자기 반성적 응답에서도 R8 예비교사는 “설명 단위가 좀 더 미시적”으로 변했으며, 이 도구는 현상을 “좀 더 체계적으로 설명하는 데에 도움이” 되었다고 응답하였다는 점은 이러한 해석을 지지한다.

그러나 이 도구가 지니는 한계도 명확하다. 사전에 현상을 설명하기 위한 개념적 틀이 없거나 오개념을 뚜렷하게 가지고 있을 경우 예비교사의 설명 수준을 높이는 데 한계가 있었다. 즉 과학적 설명 장르의 형식적 구조나 좋은 설명의 핵심 요소라는 내용적 준거의 제공만으로는 예비교사의 현상에 대한 설명수준을 증진시킬 수 없었던 것이다. 역설적이게도 이 도구는 개념적 틀을 정립하고, 미시적인 관점을 유발함으로써 예비교사의 오개념을 더 명료하게 드러내는 어포던스를 지니고 있었다. 다음은 이것에 대한 M2 예비교사의 사례이다.

[M2, 사전 1]

컵 표면 기체가 응결했기 때문(결로현상)

물이 기체에서 액체로 응결하려면 특정 온도 이상(0°C 이상) 올라가야 한다.

냉장고 속 기온은 약 0°C 내외, 실외는 약 23°C 내외이므로 온도 변화에 따라 물도 상태 변화하였다.

[M2, 사후 1]

물은 응결점에서 응결한다.

냉장고 속에선 물 분자가 기체로 존재하나 실내, 즉 응결점 이상 온도에선 액체로 존재한다.

따라서 물방울이 맺힌다.

위 사례에서 M2 예비교사의 사전 응답은 과학적 개념(“기체가 응결했기 때문”)과 오개념(“기체에서 액체로 응결하려면 ... 0°C 이상”)이 혼재되어 나타나고 있다. 그러나 사후 응답에서 예비교사는 개념적 틀로 “물은 응결점에서 응결한다.”고 정립하고, 미시적인 관점을 적용하여 “물 분자가 ... 응결점 이상 온도에서 액체”로 존재한다고 진술했다. 즉 예비교사는 낮은 온도(“냉장고 속”, “0°C 이하”)에서는 물이 기체로, 높은 온도(“실내”, “0°C 이상”)에서는 액체로 존재한다고 인식하고, 그 기준을 “응결점”이라고 지칭함으로써 얼음의 융해 개념과 수증기의 응결 개념을 혼동하고 있음을 드러냈다. 한편 R3(2b → 3a) 예비교사는 이 도구가 논리성을 부여한다고 인식하면서도 “단, 기존의 과학 지식이 충분치 않은 상태라면 크게 도움이 되지 않을 것 같다.”고 이 도구를 평가했는데, M2 예비교사의 응답은 R3 예비교사의 이 도구에 대한 평가에 부합하는 사례이다.

V. 토의 및 결론

1. 토의

본질적인 과학적 실행으로서 학생들의 과학적 설명 구성의 가치에 기초하여, 본 연구는 과학적 설명 구성 도구가 초등 예비교사들의 설명 수준을 어떻게 변화시키며 또한 이 도구가 설명 수준 향상에 기여하는 어포던스가 무엇인지 탐색하였다. 제시된 과제는 냉장고에서 꺼낸 물병 표면에 물방울이 맺힌 이유를 설명하는 것이었다.

상당수의 예비교사들은 사전에 2수준(기술)의 응답을 하였다. 이는 온도 변화와 같이 문제 상황에 선행하는 사건을 구분할 수 있으나, 이러한 사건이 현상 발생에 어떻게 관련되는지에 대한 개념적 틀을 명시적으로 기술하지 않았음을 의미한다. 그러나 사후 응답에서는 다수의 예비교사가 3수준(연관된 설명) 이상으로 상승하며 현상을 이끌어내는 개념적 틀을 명시적으로 밝히고, 또 그에 따라 현상을 인과 측면에서 서술하려는 시도를 했다. 이러한 사례는 예비교사가 설명을 구성할 때 개념적 틀을 밝히는 것이 중요하다는 것 자체를 사전에 인지하지 못했으며, 그에 따라 인과적인 설명 역시 생성할 수 없었음을 함의한다. 특히 R1 예비교사의 사전 응답(“...비교적 따뜻한 공기가 물병의 차가운 표면과 만나...”)에서 나타났듯이 이미 ‘온도에 따른 상변화’라는 개념적 틀

을 예비교사가 암묵적으로 가지고 있을 가능성이 높다는 점, 또한 실제로 상당수의 예비교사가 사후 3수준 이상으로 상승했다는 점은 개념적 틀을 명료화하는 것이 예비교사에게도 그다지 어려운 과업이 아님을 함의한다. 따라서 현상에 대한 설명을 구성할 때 개념적 틀을 밝힐 것을 메타적으로 상기시키는 것만으로도 당장의 설명 수준 상승을 이끌 수 있을 것이다. 같은 맥락에서 물의 상변화를 분자 운동 및 분자간 거리 수준에서 설명한 3b(미시 연관적 설명) 수준은 사전에 1명에서 사후에 5명으로 증가했는데, 이 역시 예비교사들이 현상을 미시적인 수준에서 표상하고 해석하는 것이 거시적 현상을 이해하는 데 중요하다는 점을 사전에 인지하지 못했던 것으로 해석된다.

다만 3수준 역시 좋은 과학적 설명이 아니며, 두 명의 예비교사만 추가적으로 4수준(사후 총 3명)으로 상승했다는 점은 형식적이고 준거적인 특성을 지니는 이 도구가 내용 교수와 함께 활용되어야 한다는 점을 분명히 한다. 특히 서로 상호작용하는 사건, 개체, 속성 사이의 복합적 관계를 밝혀야 하는 4b수준의 응답은 사후에도 없었다는 점은 과학적 설명을 정교하게 발전시키기 위한 교수학적 모델의 개발이 필요함을 함의한다.

한편 역설적이게도 이 도구는 예비교사가 지닌 오개념을 더 명료하게 드러내도록 유도하였다. 이것 역시 예비교사가 현상을 설명하기 위해 전제가 되는 개념적 틀을 명시적으로 밝히도록 하는 이 도구의 특성에 기인하였다. 비록 연구에서 의도한 예비교사의 설명 수준 상승에 역행하는 효과이더라도, 이는 교수적 측면에서 어포던스라 할 수 있다. 즉 교사 혹은 교사교육자 입장에서 학생이나 예비교사가 지닌 선개념이 무엇인지 명료히 이해하는 것은 교수자가 지녀야 할 주요한 지식으로 여겨진다(Carlson & Dae- hler, 2019). 교수자는 학생들이 드러낸 오개념에 맞춤형 적절한 교수 전략을 취할 수 있기 때문이다. 따라서 과학적 설명 구성 도구를 통해 학생이나 예비교사들이 지닌 선개념을 명확히 하는 데 이 도구는 유용하게 쓰일 수 있을 것이다.

한편 본 연구는 수증기 포화에 의한 응결 현상이라는 예비교사들에게 익숙한 현상을 주제로 하여 일회적으로 탐구하였다. 그에 따라 본 연구에서 나타난 예비교사들의 변화가 지속될 수 있을지, 혹은 장기적인 발전을 위해 어떠한 지원이 요구되는지에 대

한 정보를 획득할 수 없었던 것은 제한점이다. 특히 SFL 관점에서 과학적 설명 장르는 과학자 커뮤니티에서 장기간에 걸쳐 문화적으로 그리고 관습적으로 정착되었고 그 구성원들은 이를 당연한 관행으로 사용한다는 점에 비추어볼 때, 본 연구에서 나타난 예비교사들의 변화가 지속 및 발전되기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 예상된다.

또한 본 연구에서 수정하여 활용한 설명 분석 체계(De Andrade *et al.*, 2019), 그리고 과학적 설명 구성을 위한 도구로서 차용한 PRO-메타언어(Tang, 2015)와 좋은 설명의 핵심 요소(De Andrade *et al.*, 2019)는 모두 내용 측면에서 화학을 기반으로 제안되었다는 점에서 논의가 필요하다. 다양한 자연 현상에 대한 과학적 설명을 구성하기 위해서는 주제-특이적이며 분과-특이적인 이해가 필수적인 것으로 논의된다. 예를 들어 천문학적 현상은 거시적인 관점에서 공간적 사고(김종욱, 2022; 이정아 등, 2015)와 시스템적 사고(맹승호 등, 2014)를 요구하며, 역학은 ‘보이지 않는 비물질’ 수준에서의 힘(장진아 등, 2023)에 대한 이해를 요구한다. 이는 과학 철학에서도 마찬가지로인데 과학적 설명 모형 역시 분과 과학 영역에 맞춘 모형에 대한 연구가 필요하다고 주장되고 있다(Woodward & Ross, 2021). 따라서 본 연구에서 활용된 과학적 설명 구성 도구와 설명 분석 체계는 각 분과적인 설명의 특성에 기초해 변형되고 개선될 필요가 있을 것이며, 이를 위해서는 교육과정에서 다루지는 분과별 주요 개념, 원리, 이론을 이해하는데 요구되는 과학적 설명 모델에 대한 분석이 필요할 것이다.

2. 함의 및 결론

과학적 설명의 형식적 구조와 내용적 준거를 이해하는 것은 교사가 획득해야 할 주요한 내용지식 요소가 된다. Shulman(1987)이 교사가 발전시켜나가야 하는 전문적이며 실제적인 지식으로서 교수학적 내용지식(pedagogical content knowledge [PCK])을 제안한 이후 Grossman(1990)은 PCK의 지식 기반 중 하나인 내용지식이 내용(content), 실체적 구조(substantive structure), 구문적 구조(syntactic structure)로 구성된다고 보았다. 여기서 내용이 과학의 주요한 개념, 원리, 이론 혹은 그들 간의 관계 등을 의미한다면 실체적 구조는 지식이 구성되고 조직되는 패러다임이나 연구 전통을 의미하며 구문적 구조는 학문의 구성원들이 주요한 개념과 원리 등을 어떻게 설명하고

논증하며 평가하는가에 대한 합의된 규범이나 절차 등을 의미한다. 이런 점에서 예비교사가 과학적 설명의 구조와 준거를 이해한다는 것은 과학의 구문적 구조를 이해하는 것이며 또한 잠정적으로는 과학의 지식이 구성되는 연구 전통과 패러다임을 이해하는 것이라 할 수 있다. 따라서 예비교사 양성 과정에서 내용 지식으로서 과학의 주요 산물에 대한 지도뿐만 아니라 과학적 설명의 구성과 평가로 그 관심을 확장하는 것은 예비교사의 PCK 발달에 주요한 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

다만 교사의 PCK 발달은 그 지식 기반을 교수 실천 속에서 통합하고 변형하는 과정 속에서 발달하는 것으로 전제된다(Carlson & Daehler, 2019; Gess-Newsome, 1999; Grossman, 1990; Shulman, 1987). 예비교사 스스로 과학적 설명의 구문적 구조에 대한 이해를 갖추었다 하더라도 교수 장면에서 학생들을 지도할 적절한 교수 모델을 가지고, 그것을 활용해보는 경험이 요구되는 것이다. 따라서 본 연구에 대한 후속 연구는 과학적 설명의 구성을 장려하는 교수 모델을 과학 분과와 주제의 특성을 살려 개발하고 타당화한 후 이를 교수 상황에 적용해보는 것이다. 이 과정 속에서 교사 스스로 과학적 설명 지도에 대한 신념과 인식이 어떻게 변하는지, 그들의 실천적인 지식은 어떻게 변화하는지, 그 수업을 통해 학생의 과학적 설명 구성 수준은 어떠한 변화가 생기는데에 대한 실제적인 지식을 얻을 수 있을 것으로 기대한다.

본 연구는 과학 교육에서 일상적으로 쓰이는 ‘설명’이라는 개념을 현상에 대한 이해를 목적으로 ‘왜’에 답하는 인과적이고 기계론적인 응답으로서, 지식 주장을 정당화하려는 목적의 논증과 구별되는 진술로서 개념화했다. 특히 과학적 실험의 핵심인 과학적 설명을 구성하는 수업을 하기 위해 교사가 갖춰야 하는 지식 기반으로 선행 연구에서 제시된 설명의 형식적 구조와 내용적 준거를 통합하여 과학적 설명 구성 도구를 제안했다는 점에 의의를 지닌다. 또한 이 도구를 통해 상당수 예비교사의 설명 수준은 ‘기술’에서 ‘연관적 설명’ 수준 이상으로 상승하였는데, 이것은 예비교사들이 과학적 설명에 대한 구문적 구조를 이해하고 자신의 설명 구성에 적용할 수 있음을 보여주었다는 점에서 주목할 필요가 있다. 상기 작업은 앞으로 교사 교육 프로그램이 과학적 설명에 대한 구문적 구조에 대한 이해에 더 많은 관심을 기울여야 하며, 예비교사에게 실제적인 수

업 경험 속에서 과학적 설명을 장려하는 수업을 이끌어내기 위한 실천적인 지식을 배양할 기회가 주어져야 함을 강조한다.

참고문헌

- 교육부(2022). 과학과 교육과정. 교육부 고시 제2022-33호 [별책 9]. https://www.edunet.net/nedu/ncicsvc/listSub2022Form.do?menu_id=861
- 김유신(1999). 과학적 설명. 현대 과학철학의 문제들, 대우학술총서 공동연구(pp. 145-219). 아르케.
- 김종욱(2022). 공간적 사고 관점에서 천문 분야 교과서 삽화 및 탐구활동에 대해 예비교사가 인식한 문제점과 개선안. 초등과학교육, 41(3), 501-520.
- 맹승호, 이기영, 박영신, 이정아, 오현석(2014). 순위 선다형 문항을 이용한 천문 시스템 학습 발달과정 개발 및 타당화 연구. 한국과학교육학회지, 34(8), 703-718.
- 백성혜, 박영주(2002). 초등·중등학교 과학교과서에서 나타난 열, 온도 개념에 대한 분석. 한국과학교육학회지, 22(1), 478-489.
- 오필석(2007). 중등학교 지구과학 교사들의 과학적 설명: 논리적 형식과 담화적 특징 분석. 한국과학교육학회지, 27(1), 37-49.
- 이정아, 이기영, 박영신, 맹승호, 오현석(2015). 초등학교 태양계와 별 수업에서 나타나는 공간적 사고 사례 연구. 한국과학교육학회지, 35(2), 179-197.
- 장진아, 박준형, 박지선(2023). 공기 압력에 대한 초등영재 학생들의 과학그리기 및 과학글쓰기에서 구성된 과학적 설명과 어포던스 분석: 다중모드적 표상의 교육적 활용. 초등과학교육, 42(1), 161-177.
- Australian Curriculum, Assessment and Reporting Authority. (2015). Australian Curriculum, Assessment and Reporting Authority. Retrieved from <https://www.australiancurriculum.edu.au/f-10-curriculum/science>
- Achinstein, P. (1983). The nature of explanation. Oxford University Press.
- Alameh, S., Abd-El-Khalick, F., & Brown, D. (2023). The Nature of Scientific Explanation: Examining the perceptions of the nature, quality, and “goodness” of explanation among college students, science teachers, and scientists. Journal of Research in Science Teaching, 60(1), 100-135.
- Alameh, S., & Abd-El-Khalick, F. (2018). Towards a philosophically guided schema for studying scientific explanation in science education. Science & Education, 27, 831-861.
- Berland, L. K., & Reiser, B. J. (2009). Making sense of argumentation and explanation. Science Education, 93, 26-55.
- Beyer, C. J., & Davis, E. A. (2008). Fostering second graders’ scientific explanations: A beginning elementary teacher’s knowledge, beliefs, and practice. Journal of the Learning Sciences, 17(3), 381-414.
- Braaten, M., & Windschitl, M. (2011). Working toward a stronger conceptualization of scientific explanation for science education. Science Education, 95(4), 639-669.
- Braun, V., & Clarke, V. (2016). Thematic analysis. In E. Lyons & A. Coyle (Eds.), Analysing qualitative data in psychology (pp. 84-103). Sage.
- Brockriede, W., & Ehninger, D. (1960). Toulmin on argument: An interpretation and application. Quarterly Journal of Speech, 46(1), 44.
- Carlson, J., & Daehler, K. (2019). The refined consensus model of pedagogical content knowledge in science education. In A. Hume, R. Cooper, & A. Borowski (Eds.), Repositioning Pedagogical Content Knowledge in Teachers’ Knowledge for Teaching Science. (pp.77-92). Springer.
- De Andrade, V., Freire, S., & Baptista, M. (2019). Constructing scientific explanations: A system of analysis for students’ explanations. Research in Science Education, 49, 787-807.
- Friedman, M. (1974). Explanation and scientific understanding. Journal of Philosophy, 71, 5-19.
- Glaser, B. G., & Strauss, A. L. (1967). The Discovery of Grounded Theory. Sage.
- Grossman, P. L. (1990). The Making of a Teacher: Teacher Knowledge and Teacher Education. Teachers College Press.
- Grotzer, T. A. (2003). Learning to understand the forms of causality implicit in scientifically accepted explanations. Studies in Science Education, 39(1), 1-74.
- Haefner, L. A., & Zembal-Saul, C. (2004). Learning by doing? Prospective elementary teachers’ developing understandings of scientific inquiry and science teaching and learning. International Journal of Science Education, 26, 1653-1674.
- Halliday, M. A. K. (1993). On the Language of Physical Science. In M. A. K. Halliday & J. R. Martin (Eds.), Writing science: Literacy and discursive power (pp. 54-68). University of Pittsburgh Press.
- Halliday, M. A. K., & Matthiessen, C. M. (2013). Halliday’s introduction to functional grammar. Routledge.
- Hempel, C., & Oppenheim, P. (1948). Studies in the logic of explanation. Philosophy of Science, 15, 135-175.

- Ladyman, J. (2003). 과학철학의 이해. (박영태 역). 이학사. (원저출판 2002)
- McCain, K. (2015). Explanation and the nature of scientific knowledge. *Science & Education*, 24, 827-854.
- McCain, K. (2022). Why explanation matters in science. In understanding How Science Explains the World. (pp. 1-12). Cambridge University Press.
- McNeill, K. L., & Krajcik, J. (2008). Scientific explanations: Characterizing and evaluating the effects of teachers' instructional practices on student learning. *Journal of Research in Science Teaching*, 45(1), 53-78.
- National Research Council. (2007). Taking science to school: Learning and teaching science in grades K-8. Committee on Science Learning, Kindergarten through Eighth Grade. In R. A. Duschl, H. A. Schweingruber, & A. W. Shouse (Eds.), Board on Science Education, Center for Science Education, Division of Behavioral and Social Sciences and Education. The National Academies Press.
- National Research Council. (2012). A framework for K-12 science education: Practices, crosscutting concepts, and Core ideas. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/13165>
- Newsome, J. (1999). Pedagogical content knowledge: An introduction and orientation. In J. Gess-Newsome & N. G. Lederman (Eds.). Examining pedagogical content knowledge: The construct and its implications for science teaching (pp. 3-17). Kluwer Academic Publishers.
- NGSS Lead States. (2013). Next generation science standards: For states, by states. Retrieved from <http://www.nextgenscience.org/>
- Osborne, J. F., & Patterson, A. (2011). Scientific argument and explanation: A necessary distinction? *Science Education*, 95, 627-638.
- Putra, G. B. S., & Tang, K. S. (2016). Disciplinary literacy instructions on writing scientific explanations: A case study from a chemistry classroom in an all-girls school. *Chemistry Education Research and Practice*, 17(3), 569-579.
- Rappa, N. A., & Tang, K. S. (2018). Integrating disciplinary-specific genre structure in discourse strategies to support disciplinary literacy. *Linguistics and Education*, 43, 1-12.
- Ruiz-Primo, M. A., Li, M., Tsai, S. P., & Schneider, J. (2010). Testing one premise of scientific inquiry in science classrooms: Examining students' scientific explanations and student learning. *Journal of Research in Science Teaching*, 47(5), 583-608.
- Salmon, W. C. (1989). Four decades of scientific explanation. University of Minnesota Press.
- Shulman, L. S. (1987). Knowledge and teaching: Foundations of the new reform. *Harvard Educational Review*, 57(1), 1-22.
- Tang, K. S. (2015). The PRO instructional strategy in the construction of scientific explanations. *Teaching Science*, 61(4), 14-21.
- Tang, K. S. (2023). 대화하는 과학 교실: 과학 교수학습을 위한 담화 전략. (이정아, 장진아, 박준형 역). 학이시습. (원저출판 2021)
- Tang, K. S., & Rappa, N. A. (2021). The role of meta-language in an explicit literacy instruction on scientific explanation. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 19, 1311-1331.
- Windschitl, M., Thompson, J., & Braaten, M. (2008). How novice science teachers appropriate epistemic discourses around model-based inquiry for use in classrooms. *Cognition and Instruction*, 26(3), 310-378.
- Woodward, J. F., & Ross L. N., (2021). Scientific Explanation. In Edward N. Zalta (ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Summer 2021 Edition). Retrieved from <https://plato.stanford.edu/archives/sum2021/entries/scientific-explanation/>
- Yang, H. T., & Wang, K. H. (2014). A teaching model for scaffolding 4th grade students' scientific explanation writing. *Research in Science Education*, 44, 531-548.
- Yao, J. X., Guo, Y. Y., & Neumann, K. (2016). Towards a hypothetical learning progression of scientific explanation. *Asia-Pacific Science Education*, 2(1), 1-17.
- Zangori, L., & Forbes, C. T. (2014). Scientific practices in elementary classrooms: Third-grade students' scientific explanations for seed structure and function. *Science Education*, 98(4), 614-639.

김종욱, 서울길동초등학교 교사(Jong-Uk Kim; Teacher, Seoul Gil-dong Elementary School).

† 임성은, 서울대학교 교육종합연구원 객원연구원(Sung-Eun Lim; Visiting researcher, Center for Educational Research, Seoul National University).