



과학적 실행에서 학생들이 경험하는 불확실성에 대한 이론적 고찰

이정화, 심수연*

서울대학교

Understanding Students' Engagement with Uncertainty in Scientific Practices: A Theoretical Review

Jeong-Hwa Lee, Soo-Yean Shim*

Seoul National University

ARTICLE INFO

Article history:

Received 21 October 2024

Received in revised form

27 October 2024

Accepted 13 November 2024

Keywords:

types of uncertainty,
uncertainty management
(raising · maintaining · reducing),
epistemic affect

ABSTRACT

This study reviews the literature to explore the meaning of uncertainty in science education, how students navigate uncertainty in scientific practices, and how teachers can support students in these processes. We identified three key themes from our review of prior studies: 1) the nature of uncertainty inherent in both scientists' and students' inquiries, 2) how students manage uncertainty in collaborative knowledge-building and how teachers can support these processes, and 3) students' epistemic affect and teachers' epistemic empathy. Regarding the first theme, we discussed the meaning of uncertainty in science education as an inherent aspect of scientific knowledge and inquiry, and we explained three types of uncertainty that students express and navigate: conceptual, epistemic, and relational. For the second theme, we described the processes through which students manage uncertainty—raising, maintaining, and reducing it—and explained how teachers can productively support these processes. Teachers may face challenges in balancing how much to “step in” versus “step back,” addressing individual students' queries and ideas while pursuing the learning goals of the whole classroom community, and reorganizing the curriculum to support students' coherent sense-making while still achieving the intended outcomes. We proposed several instructional strategies for curriculum design, lesson planning, and implementation to address these challenges. The third theme explores the different types of epistemic affect that students experience while navigating uncertainty in scientific practices and highlights the importance of teachers cultivating epistemic empathy. This study can contribute to future research aimed at introducing uncertainty into school science and offers concrete implications for teachers and teacher educators involved in this effort.

1. 서론

“과학은 절대적 진리를 제공하는 것이 아니라, 새로운 증거와 발견에 의해 언제든지 수정될 수 있는 지식 체계를 구축하는 것이다. 따라서 과학적 탐구는 불확실성을 인정하고, 그것을 통해 더 깊은 이해를 추구하는 과정이다(장하석, 2015).”

인공 지능과 팬데믹으로 대표되는 급변하는 시대를 살아가는 학생들에게 불확실성에 적응하고 대처할 수 있는 역량은 점점 필수적인 것으로 떠오르고 있다. 이는 2022 개정 교육과정에서 “디지털 전환, 기후·생태환경 변화 등에 따른 미래 사회의 불확실성에 능동적으로 대응할 수 있는 능력”을 중점 요소 중 하나로 강조한다는 점에서 잘 드러난다. 이러한 교육 목표의 변화는 과학 수업을 이끄는 교사와 과학 교육 연구자들에게도 주요한 화두가 되고 있다. 이에 따라 학교 과학에서도 이러한 변화의 흐름을 반영하는 과학 수업을 설계하고자 최근 과학 탐구에 내재된 본성으로서의 불확실성에 주목하는 연구들이 수행되고 있다(Chen, Benus, & Hernandez, 2019; Chen *et al.*, 2024; Ford, 2008; Kaur & Dasgupta, 2024; Kervinen & Aivelo, 2023; Manz & Suárez, 2018; Pierson, Brady, & Lee, 2023; Watkins *et al.*,

2018; Watkins & Manz, 2022).

서두에서 과학철학자 장하석이 그의 저서를 통해 밝힌 바와 같이, 과학은 불확실성을 관리하고 이해하는 과정으로 과학적 탐구를 통해 구성된 지식은 새로운 증거와 이론에 의해 언제든지 수정될 수 있다(장하석, 2015; Ford, 2008; Latour, 1987; Pickering, 1995). 과학자들은 실험을 설계하고 수행하는 탐구 과정에서 실험 도구의 한계나 데이터의 오류 가능성은 물론이며, 실험 결과의 예측 불가능성을 항상 인지하고 있다는 점에서 불확실성을 경험하는 것에 익숙하다고 할 수 있다(Gooding, 1990; Kampourakis & McCain, 2019; Watkins *et al.*, 2018). 그러나 학생들은 과학 수업에서 마주하는 불확실성을 불편한 것으로 인식하며 종종 회피하는 경향을 보이는데(Manz, 2015), 이는 그들이 그동안 “교실 게임”(Lemke, 1990)이나 “정답 찾기”(Hutchison & Hammer, 2010)로 일컬어지는 정확한 과학 용어를 사용하여 과학적 개념과 설명을 암기하는 전형적인 과학 수업에 익숙해졌던 것에서 기인한 것으로 설명할 수 있다. 그러므로 교사는 학생들이 “수업하기(doing the lesson)”가 아닌 “과학하기(doing science)”(Jiménez-Aleixandre, Rodríguez, & Duschl, 2000)에 참여하여 과학 탐구에 내재된 불확실성을 능동적으로 경험하도록 지원해

* 교신저자 : 심수연 (sys7829@snu.ac.kr)

<http://dx.doi.org/10.14697/jkase.2024.44.6.603>

야 한다. 더불어 연구자들은 교실과 과학 연구소 사이의 사회적 구조, 규범, 목표 등의 차이를 신중하게 파악하여(Manz & Suárez, 2018), 과학자들이 경험하는 불확실성을 교실 환경에 적합한 형태로 도입해야 한다.

교사나 교과서의 안내가 부재한 상태에서 학생들에게 전적으로 탐구를 설계하고 수행하도록 일임하는 것은 학생들이 불확실성을 경험하도록 하는 데 효과적인 전략이 아닐 것이다(Engle, 2011). 교사가 교과서의 탐구 절차에 따라 안내하는 요리책 형식의 과학 탐구 또한 학생들이 데이터를 수집하거나 해석하는 방식에서 의외성이나 비판적인 관점을 공유할 여지가 거의 없으므로, 자신들이 참여하는 과학적 실험의 목적을 이해하거나 주장과 설명을 구성해 볼 필요성을 느끼지 못하도록 한다(Berland & Hammer, 2012). 그러므로 학생들이 불확실성을 회피하지 않고 능동적으로 해결해 나갈 수 있도록 지원하기 위해서는, 그들이 과학 탐구에서 직면할 탐구 대상의 모호함이나 의사 결정 과정에서의 혼란을 전략적으로 계획하여 학습 환경을 설계하는 것이 필요하다(Manz, 2015a, 2015b; Metz, 2004, 2008).

학생들이 과학 탐구에 내재된 불확실성에 직면하고 대응하도록 하는 것은 그들의 진정한 과학 실험 참여를 보장하는 중요한 수단이 될 수 있다(Chen, 2021). Engle & Conant(2002)는 학생들이 학문적 실험에 깊이 있게 참여하면서도 개념적 이해를 효과적으로 학습하도록 이끄는 구체적인 방법으로, ‘학문적 내용을 문제화(problematizing)하여 탐구할 대상으로 간주하도록 지원하기, 학생들에게 학습과 탐구에 대한 접근 방식을 결정할 수 있는 권한을 부여하기, 동료뿐만 아니라 자신이 학습하는 학문의 규범과 기준에 책임감을 갖도록 하기, 탐구 문제 해결에 필요한 물질적, 지적 자원을 충분히 제공하기’라는 네 가지 원칙을 제시하였다. Chen(2020)은 이러한 네 가지 원칙을 적용하여 학생들이 논변 실험에서 교사의 지원을 바탕으로 시간이 지남에 따라 불확실성을 주도적으로 관리할 수 있음을 입증하였다. 즉, 학생들은 불확실성을 생산적으로 다루는 경험을 통해 자신이 학습하는 학문에 대한 개념적 이해를 향상시키며 학문적 실험에 깊이 있는 참여를 할 수 있는 잠재력을 지니고 있다(Hammer, 2000).

학생들의 깊이 있는 학문적 실험 참여를 지원하기 위해 불확실성을 과학 수업에 도입할 필요가 있다는 주장을 뒷받침하는 선행 연구를 살펴본 결과, 다음과 같이 세 가지 주요한 흐름이 나타났다. 첫째, 과학자들이 탐구 과정에서 경험하는 불확실성(Ford, 2008; Gooding, 1990; Latour, 1987; Pickering, 1995)과 과학적 실험에 참여한 학생들이 경험하는 불확실성(Chen & Jordan, 2024; Chen *et al.*, 2024; Darnon, Doll, & Butera, 2007; Ha, Chen, & Park, 2024; Hartner-Tiefenthaler *et al.*, 2018; Jordan & McDaniel, 2014; Kaur & Dasgupta, 2024)을 설명한 연구들이 수행되었다. 이러한 연구 중 일부는 불확실성을 과학 탐구에 내재된 속성으로 설명하고 있으며, 또 다른 몇몇 연구들은 개인이 기존의 과학적 이해를 어떻게 새로운 정보에 통합할 수 있는지, 또는 특정한 현상이나 미래의 결과를 설명하거나 예측할 수 있는지에 대해 확신하지 못하는 상태라고 설명한다. 후자의 경우 불확실성은 과학적 실험에 참여한 학생들이 협력적 지식 구성 과정 중에 개념적, 인식적 또는 관계적 측면에서 경험하고 극복할 수 있는 것으로 논의되고 있다. 이처럼 선행연구에서 제시된 불확실성의 의미는

다층적이므로, 학생들이 과학자처럼 불확실성을 경험하도록 지원하기에 앞서 과학 교육에서 불확실성의 의미를 고찰해 볼 필요가 있다.

둘째, 학생들이 과학 수업에서 불확실성을 관리하는 구체적인 과정을 탐색한 연구들(Chen, 2022; Chen, Benus, & Hernandez, 2019; Chen & Techawitthayachinda, 2021; Ha, Chen, & Park, 2024; Kaur & Dasgupta, 2024; Kirch, 2010; Metz, 2004)과 이러한 수업을 이끄는 교사들의 딜레마를 보여주는 연구들(Cherbow & McNeill, 2022; Manz & Suárez, 2018; Watkins & Manz, 2022), 그리고 학교 과학에 불확실성을 도입하기 위한 교수 지원 방안을 제시한 연구들(Engle, 2011; Engle & Conant, 2002; Kervinen & Aivelo, 2023; Ko & Krist, 2019; Phillips, Watkins, & Hammer, 2018; Reiser *et al.*, 2021)이 수행되었다. 이러한 연구들은 학생들이 다루는 불확실성이 곧 그들의 과학적 실험을 이끄는 중요한 학습 자원이 될 수 있으며, 학생들은 마주한 불확실성을 유지하거나 감소하는 고군분투의 과정을 거쳐 일관된 지식 체계를 발달시키게 됨을 설명한다. 또한, 교사들은 불확실성과 씨름하는 학생들의 지식 구성 과정에 주의를 기울이고, 주어진 교육과정 경로에 의존하기보다 학생들의 선택에 유연하게 대응할 수 있는 전문성 함양이 요구된다. 이러한 선행 연구의 중요한 함의 중 하나는 학생들이 능동적으로 불확실성을 제기하고, 유지하고, 감소하며 관리하는 과정에서 지식 구성을 위한 주체적 행위자로 위치하게 된다는 점이다(Ko & Luna, 2024; Stroupe, 2014; Stroupe, Caballero, & White, 2018).

셋째, 학생들이 현상을 이해하기 위해 지식을 구성하는 과정에서 마주하는 감정을 탐색한 연구들(Davidson, Jaber, & Southerland, 2020; Han & Kim, 2018; Jaber & Hammer, 2016a, 2016b; Pierson, Brady, & Lee, 2023)과 교사가 그러한 학생들의 감정에 공감할 수 있는 능력의 중요성을 강조한 몇몇 연구들(Davidson, Jaber, & Southerland, 2020; Jaber, 2021; Jaber, Dini, & Hammer, 2022; Jaber & Hammer, 2016b; Jaber, Southerland, & Dake, 2018; Lowell, 2024)이 수행되었다. 이러한 연구들은 학생들이 과학적 탐구 과정에서 마주하는 부정적 감정을 긍정적 감정으로 재구성할 수 있는 잠재력이 있으며, 이는 교사의 ‘인식적 공감’을 통해 개발될 수 있다고 주장한다. 즉, 학생들의 진정한 과학 실험 참여를 돕기 위해서는 그들의 개념적, 인식적 측면과 아울러 감정적 측면을 함께 살펴볼 필요가 있음을 알 수 있다.

위와 같은 세 가지 흐름에 기반하여, 본 연구에서는 과학 교육에서 불확실성의 의미를 탐색하고, 과학적 실험에 참여하는 학생들이 불확실성을 경험하는 과정을 분석하여 학교 과학에 불확실성을 도입하는 방안을 제시하고자 한다. 이와 같은 연구 목적에 따라 먼저, 선행연구에서 설명하는 과학자들의 탐구에 내재된 불확실성의 의미를 탐색하고, 학생들이 과학적 실험에서 경험하는 불확실성의 세 가지 유형을 고찰한다. 두 번째로, 학생들이 불확실성을 관리하는 구체적인 과정과 이를 지원하는 교사의 딜레마, 그리고 과학 수업에 불확실성을 도입하기 위한 교수 지원 방안을 살펴본다. 마지막으로, 학생들이 과학적 실험에 참여하여 마주하는 인식적 감정의 의미가 무엇인지 탐구하고, 이러한 감정에 교사가 인식적으로 공감하여 대응하기 위해서는 어떤 지원이 필요한지 분석한다.

II. 연구 방법

본 연구의 목적은 과학 교육에서 불확실성의 의미를 탐색하고, 과학적 실행에 참여하는 학생들이 불확실성을 경험하는 과정을 분석하여 학교 과학에 불확실성을 도입하는 방안을 제시하는 데 있다. 이와 같은 연구 목적을 달성하기 위해 우리는 분석 대상 선정, 핵심어 추출 및 주요 주제 선정, 주제별 문헌 분석 및 하위 주제 생성의 세 단계를 거쳤다. 첫째로, 우리는 국내외 저명 학술지인 한국과학교육학회지, *Cognition and Instruction*, *Journal of Research in Science Teaching*, *Journal of the Learning Sciences*, *Science Education*, *Science & Education*, *International Journal of Science Education*에서 ‘불확실성 (uncertainty), 과학적 불확실성 (scientific uncertainty), 불확실성 관리 (uncertainty management)’를 주요 키워드로 검색하여 과학 교육 분야에서 이루어진 불확실성에 관한 연구 43편을 주된 분석 대상으로 선정하였다. 이 중, 해당 논문의 집필 수가 많은 상위 세 저자(Chen 13편, Jaber 8편, Manz 6편)의 참고 문헌을 연계적으로 검색하여 교육학(24편), 사회학(7편), 심리학(5편), 과학 철학(4편) 분야에서 40편을 추가한 총 83편을 분석 대상으로 선정하였다.

우리는 두 번째 단계에서 각 문헌의 핵심어를 추출하여 과학 탐구에 내재된 불확실성, 학생들이 불확실성을 관리하는 과정과 교수 지원 방안, 학생들의 인식적 감정과 교사의 인식적 공감이라는 세 가지 주요 주제를 선정하였다. 이를 위해 각 문헌의 주요 내용과 불확실성을 둘러싼 연구 맥락을 정리하고, 이를 아우르는 핵심어를 부여하는 1차 코딩을 실시하였다. 이때 핵심어는 각 문헌에서 주요하게 다루는 내용에 따라 단일 또는 중복으로 부여하였으며, 문헌 간 공통 핵심어가 추출된 이론적 배경, 연구의 한계점, 추후 연구의 필요성이 논의된 부분을 중점적으로 분석하였다. 이에 따라 핵심어를 둘러싼 문헌들의 전반적인 연구 흐름과 최신 동향을 파악할 수 있었다.

세 번째 단계에서는 1차 코딩 결과를 검토하여 주제별로 분류된 문헌 간 분석에 따라 다섯 가지 하위 주제를 생성하였다. 먼저, 첫 번째 주제인 불확실성의 의미를 파악하기 위해, 해당 주제에 분류된 문헌들을 바탕으로 과학자들의 탐구에 내재된 불확실성, 학생들이 경험하는 불확실성이라는 두 가지 하위 주제를 생성하였다. 특히 불확실성을 개념적, 인식적, 관계적 측면에서 논의한 문헌들에 기반하여, 과학적 실행에 참여하는 학생들이 경험하는 불확실성을 세 가지 유형으로 고찰하였다. 다음으로, 두 번째 주제인 불확실성 관리 및 지원을 주요 내용으로 다룬 문헌들을 바탕으로 학생들이 불확실성을 제기하고, 유지하고, 감소하는 구체적인 과정을 파악하였다. 더불어 각 과정 또는 불확실성 관리 전반에서 교사가 겪을 수 있는 딜레마를 논의하고, 과학 수업에 불확실성을 통합시키기 위한 구체적인 전략을 제시하였다. 이를 통해 학생들이 불확실성을 제기, 유지 및 감소하며 관리하는 과정, 학생들의 불확실성 경험을 지원하는 교사의 딜레마, 학교 과학에 불확실성을 도입하기 위한 교수 지원 방안이라는 세 가지 하위 주제를 생성하였다. 세 번째 주제는 불확실성을 경험하는 학생들이 마주하는 감정과 이에 대한 교사의 공감을 다룬 문헌들에 기반하여 선정하였다. 이는 앞서 제시한 두 주제를 감정의 측면에서 확장한 것으로, 해당 문헌들은 대체로 2010년대 이후에 등장하며 과학 교육의 불확실성 분야에서 비교적 최신 연구 동향으로 자리 잡고 있었다. 인식적 감정의 종류, 역할, 선행 연구의 한계점과 추후 연구

방향, 그리고 교사 공감 연구의 필요성에 기반하여 세 번째 주제를 고찰하였다. Table 1은 세 가지 주요 주제와 다섯 가지 하위 주제별 문헌 분석 결과를 간략히 나타낸 것이다. 마지막으로, 위의 세 단계를 반복적으로 재확인하며 주요 주제 및 하위 주제에 분류된 문헌 분석 결과를 재검토하였다. 저자 간 논의를 통해 합의에 이른 내용만을 연구 결과로 정리하여 분석의 신뢰성을 확보하였다.

III. 과학 탐구에 내재된 불확실성

우리는 이번 단락에서 과학자들이 탐구 과정에서 경험하는 불확실성의 의미를 고찰한다. 그리고 과학적 실행에 참여하는 학생들이 불확실성을 경험하는 과정에서 마주하는 불확실성을 개념적, 인식적, 관계적의 세 가지 유형으로 살펴본다.

1. 과학자들의 탐구에 내재된 불확실성

불확실성은 과학의 본성을 반영하는 것으로(Ford, 2008), 과학 지식의 발달을 이끄는 주요한 원동력이다. 과학자들은 실험 도구를 활용하여 측정하는 과정이나 데이터를 해석하는 여러 가지 방법, 그리고 현상을 설명하는 과정과 같이 과학 탐구의 여러 단계에서 불확실성을 경험한다(Gooding, 1990; Latour, 1987). 예를 들어, 과학자들은 실험 장비의 한계와 오류 가능성을 인식하고 이를 극복할 방법을 개발해야 한다(Gooding, 1990). 또한, 과학자들은 실험을 설계하고 수행할 때 예상치 못한 결과나 변수에 직면할 수 있고, 이러한 요소들이 실험의 결과를 예측 불가능하게 만들 수 있음을 인지해야 한다. Gooding(1990)은 실험 도구 및 실험 과정에 내포된 불확실성을 인식하는 것이 과학자들의 협력적 의사소통을 통해 자연현상을 설명하는 과정에서 불확실성을 극복하는 데 다양한 전략을 제시해 줄 수 있다고 강조했다. Latour(1987) 또한 과학자들이 집단적으로 불확실성을 관리하는 과정을 통해 과학 지식이 형성된다는 점을 강조하며, 실험과 데이터 해석에 영향을 미칠 수 있는 변수나 조건을 지속적으로 검증하는 논쟁과 합의를 거쳐 자연현상에 대한 새로운 이해가 형성됨을 설명했다. 과학 지식의 구성이 객관적 사실의 축적으로 이루어진다는 전통적인 관점과 대조를 이루는 Latour의 접근법은 Pickering(1995)의 과학적 실행에 내재된 불확실성 분석에서도 찾아볼 수 있다.

Pickering(1995)은 과학 지식이 단순히 사실이 축적된 것이 아니라 사회적, 기술적, 개념적, 자연적 요소들이 예측할 수 없는 방식으로 상호작용하며 역동적으로 변화함을 주장했다. Pickering과 그의 동료들은 ‘뒤얽힘(mangle)’이라는 개념을 사용하여 과학적 연구가 다양한 힘과 관계들 사이의 상호작용으로 뒤얽힌다고 설명했다. 이는 과학 지식이 생성되고 발전하는 과정에서 다양한 측면들이 복합적으로 연관되어 있음을 시사하고, 과학적 불확실성은 이러한 상호작용 및 관계의 결과로서 제시되며, 과학 지식의 가변성과 한계를 인정하는 관점에서 다뤄진다. 정리해 보자면, 과학자들은 과학이라는 학문을 수행하는 과정에서 필연적으로 불확실성을 마주하며, 이를 극복하기 위해 동료들과 협력적으로 상호작용한다. 또한, 과학자 공동체에서 합의된 과학 지식은 새로운 증거나 관점에 따라 수정될 수 있으며, 이와 같은 집합적인 불확실성 관리를 통해 구성된 과학 지식은 역동적으로 진화하는 본성을 지닌다.

Table 1. Three key themes and five sub-themes extracted from a literature review on uncertainty in science education

핵심어	과학 교육 분야의 불확실성 관련 문헌	주요 주제 및 하위 주제	계
과학자 불확실성	· “Uncertainty: How it makes science advance” (Kampourakis & McCain, 2019) 외 5편(Chen, 2021; Ford, 2008; Gooding, 1990; Latour, 1987; Pickering, 1995)	과학자들의 탐구에 내재된 불확실성	6
학생 학습과 불확실성, 개념적 불확실성, 인식적 불확실성, 관계적 불확실성	· 학생 학습과 불확실성: “Positioning as not-understanding: The value of showing uncertainty for engaging in science” (Watkins <i>et al.</i> , 2018) 외 13편(Beghetto, 2017; Buck, Lee, & Flores, 2014; Ford & Forman, 2006, 2015; Kirch & Siry, 2012; Lee <i>et al.</i> , 2014; Lopes, 2010; Manz, 2015a, 2015b; Metz, 2008; Pallant & Lee, 2015; Radinsky, 2008; Retzbach, Otto, & Maier, 2016) · 개념적 불확실성: “Managing uncertainty during collaborative problem solving in elementary school teams: The role of peer influence in robotics engineering activity” (Jordan & McDaniel, 2014) 외 4편(Chen & Jordan, 2024; Chen <i>et al.</i> , 2024; Darnon, Doll, & Butera, 2007; Tiberghien, Cross, & Sensevy, 2014) · 인식적 불확실성: “When relational and epistemological uncertainty act as driving forces in collaborative knowledge creation processes among university students” (Hartner-Tiefenthaler <i>et al.</i> , 2018) 외 7편(Chen & Jordan, 2024; Chen <i>et al.</i> , 2024; Kirch, 2010; Lee <i>et al.</i> , 2019; Lee, Lee, & Zeidler, 2020; Metz, 2004; Tiberghien, Badreddine, & Cross, 2018) · 관계적 불확실성: “Investigating the interplay of epistemological and positional framing during collaborative uncertainty management” (Kaur & Dasgupta, 2024) 외 6편(Babrow & Matthias, 2015; Gill & Babrow, 2007; Hartner-Tiefenthaler <i>et al.</i> , 2018; Jordan & McDaniel, 2014; Knobloch & Solomon, 2002; Zaslavsky, 2005)	과학 탐구에 내재된 불확실성 학생들이 경험하는 불확실성	30 ¹⁾
불확실성 관리 (제거-유지-감소)	· “Managing uncertainty in scientific argumentation” (Chen, Benus, & Hernandez, 2019) 외 10편 (Berland & Reiser, 2011; Chen, 2020, 2022; Chen & Qiao, 2020; Chen & Techawitthayachinda, 2021; Ha, Chen, & Park, 2024; Ha, Park, & Chen, 2024; Lenzer, Smarsly, & Graulich, 2020; Park, <i>et al.</i> , 2023; Rapkiewicz <i>et al.</i> , 2023)	학생들이 불확실성을 제거, 유지 및 감소하며 관리하는 과정	11
불확실성 관리 지원 전략	· “Supporting teachers to negotiate uncertainty for science, students, and teaching” (Manz & Suárez, 2018) 외 4편(Chen, 2024; Colley & Windschitl, 2016; Starrett <i>et al.</i> , 2024; Watkins & Manz, 2022)	학생들이 불확실성을 관리하는 과정과 교수 지원 방안	5
과학 수업에 불확실성 도입하기	· “Designing for and Analyzing Productive Uncertainty in Science Investigations” (Manz, 2018) 외 14편(Blumenfeld, Mergendoller, & Swarthout, 1987; Cherbaw & McNeill, 2022; Doyle & Carter, 1984; Engle, 2011; Henningsen & Stein, 1997; Herbst, 2003; Kervinen & Aivelo, 2023; Kervinen <i>et al.</i> , 2020; Ko & Krist, 2019; Ko & Luna, 2024; Lehrer & Schauble, 2012; Manz, Lehrer, & Schauble, 2020; Reiser, 2004; Varelas <i>et al.</i> , 2007)	학교 과학에 불확실성을 도입하기 위한 교수 지원 방안	15
인식적 감정	· “Learning to feel like a scientist” (Jaber & Hammer, 2016b) 외 9편(Bellocchi, 2018; Bellocchi & Ritchie, 2015; Jaber & Hammer, 2016a; Kapur, 2016; Kapur & Bielaczyc, 2012; Radoff, Jaber, & Hammer, 2019; Tomas, Rigano, & Ritchie, 2016; VanLehn <i>et al.</i> , 2003; Warshauer, 2015)	학생들의 인식적 감정과 교사의 인식적 공감	16
인식적 공감	· “Cultivating epistemic empathy in preservice teacher education” (Jaber, Southerland, & Dake, 2018) 외 5편(Davidson, Jaber, & Southerland, 2020; Horsthemke, 2015; Jaber 2021; Jaber, Dini, & Hammer, 2022; Lowell, 2024)		
합계			83

2. 학생들이 경험하는 불확실성

과학자뿐만 아니라 학생들 또한 불확실성을 경험하고 극복하는 과정을 통해 능동적으로 과학 지식을 구성할 수 있음을 보여주는 몇몇 연구들이 수행되었다. 우리는 학생들이 과학적 실험 과정에서 마주하는 불확실성을 아래와 같이 세 가지 유형으로 설명한다.

가. 개념적 불확실성(conceptual uncertainty)

학생들은 논의 중인 자연현상과 관련된 과학 지식이나 개념에 대한 이해가 불완전한 경우에 불확실성을 마주할 수 있다. Chen을 포함한 몇몇 학자들은 이를 ‘개념적 불확실성’이라는 용어로 설명한 바 있다 (Chen & Jordan, 2024; Chen *et al.*, 2024; Ha, Chen, & Park, 2024). 개념적 이해란 특정 주제와 관련된 내용 지식과 일상 지식을 습득하고, 실질적으로 파악하는 것을 의미한다(Chen *et al.*, 2024; Ha, Chen,

& Park, 2024). 여기서 내용 지식은 뉴턴의 운동 법칙, 다윈의 진화론, 보일의 압력과 부피 간의 관계 등과 같은 사실, 이론, 개념을 제공하고, 일상 지식은 학생들이 일상생활에서 관찰과 경험을 통해 습득한 비형식적 지식으로 복잡하거나 추상적인 개념을 직관적으로 이해하는데 도움을 준다. Jordan & McDaniel(2014)은 문제를 해결하는 데 모둠원의 지식이 충분한지를 평가하는 것에 대한 불확실성, Hartner-Tiefenthaler *et al.*(2018)은 과제의 내용에 대한 의심 및 지식과 이해에 관련된 불확실성, 그리고 Darnon, Doll, & Butera(2007)는 지식이나 정보가 불완전하거나 애매하여 논란의 여지가 있는 경우 발생하는 불확실성을 언급하였는데, 저자들은 공통적으로 학생들이 다루는 지식이 불충분할 때 비롯되는 불확실성이 개인이나 공동체의 학습에 영향을 미칠 수 있다고 설명했다. 더불어 Buck, Lee, & Flores(2014)는 학생들이 과학적 논변 활동에서 주장을 뒷받침하는 증거에 포함할 데이터를 선택하는 과정에서 불확실해 하는 모습을 보며, 이 사례를 증거 구성에 필요한 과학 내용 지식에 대한 이해가 부족했던 것에서 비롯된 불확실성으로 설명했다. 개념적 불확실성은 학생이 학습할 목표 지식과 관련된 선행 지식이나 일상 경험을 스스로 검토하고,

1) 하위 주제와 해당 주제로 분류된 문헌의 합계 차이는 핵심어가 문헌마다 단일 또는 중복으로 부여되었기 때문이다.

그들의 기존 이해와 목표 지식 사이의 간극을 인식하도록 하는 데 활용될 수 있다(Chen & Jordan, 2024).

그러나 전통적인 과학 수업에서 개념적 불확실성은 선행 지식과의 연관성을 추론할 기회로 활용되기보다 학생이 교사가 전달한 개념을 얼마나 완벽하게 암기하고 있는지를 점검하는 데 주로 활용되었다. 예를 들어 Chen *et al.*(2024)은 교사 K의 8학년 과학 수업 일부를 제시하여 개념적 불확실성이 오용된 사례를 보여주었다. 교사 K는 학생들에게 천연자원과 재생 에너지의 의미를 반복적으로 물으며 개념적 불확실성을 제기하지만, 학생들에게 일상 지식과 주제를 연결할 기회를 제공하거나 추론할 시간을 주지 않았다. 즉, 교사 K는 학생들에게 개념적 불확실성을 탐색하도록 지원하기보다 곧바로 정보를 제공하며 자신의 질문에 자체적으로 답변을 이어나가는 모습을 보였다. Chen *et al.*(2024)에 따르면 교사가 과학적으로 올바른 정보를 제공하는 것이 반드시 학생들의 불확실성을 해결하는 것으로 이어지지 않는다. 개념적 불확실성은 학생들의 기존 이해와 목표 지식 사이의 격차에 대한 인식을 통해, 그들이 알고 있는 것의 한계를 탐구하도록 동기를 부여하고, 나아가 어떠한 이해를 추구해야 하는지 명확히 알도록 돕는다. 그러므로 교사들은 학생들에게 주어진 자연현상이나 주제를 그들의 선행 지식이나 일상 경험과 연관 짓도록 충분히 탐구할 기회를 제공해야 한다.

나. 인식적 불확실성(epistemic uncertainty)

불확실성은 자연현상에 대한 과학적 설명을 구성하는 각 과정에도 내포되어 있다(Chen & Jordan, 2024; Chen *et al.*, 2024; Hartner-Tiefenthaler *et al.*, 2018). 이러한 과정에서 학생들은 실험을 어떻게 설계할 수 있는지, 데이터를 어떻게 수집하고 분석하여 경향성을 찾을 수 있는지, 데이터를 어떻게 근거로 해석할 수 있는지, 과학적 주장을 어떻게 생성할 수 있는지, 자신의 논변을 어떻게 과학적 이론에 연결시킬 수 있는지에 관한 불확실성을 마주한다(Chen & Qiao, 2020; Kirch, 2010; Metz, 2004). Chen과 동료들은 ‘인식적 불확실성’이라는 용어를 도입하여, 이를 학습자가 ‘지식을 생성하는 방법’에 대해 불확실해 하는 것으로 설명했다. Hartner-Tiefenthaler *et al.*(2018)에 따르면, 인식적 불확실성은 학습자가 자신의 지식 상태를 평가하여 학습 과정을 조절하고, 더 나은 이해를 위해 지속적으로 노력하도록 해준다.

Lee와 동료들은 논변에 참여한 학생들이 데이터를 근거로 해석하거나 주장을 뒷받침하는 근거를 평가하는 데 필요한 인식적 이해가 부족할 때, 불확실성이 제기될 수 있다고 주장했다(Kelly & Licona, 2018; Ryu & Sandoval, 2012). 인식적 이해란 여러 아이디어 중에서 특정 아이디어가 우월함을 판단하는 기준을 수용하여 적용하는 것으로(Duschl & Osborne, 2002), 아이디어를 뒷받침하는 데이터나 근거를 비판적으로 평가하는 데 도움을 준다. Lee *et al.*(2014)는 학생들이 주장을 뒷받침하는 증거의 적절성이나 신뢰성을 평가하는 것과 이론과 실제 증거를 연결하는 과학적 추론을 가장 혼란스러워 한다고 보고했다. 나아가 Lee *et al.*(2019)는 학생들이 자신의 주장이나 결론에 대해 얼마나 확신이 없는지를 명확히 인식할수록, 이론과 증거를 연결하기 위해 보장(warrant)과 정당화(justification)를 더욱 효과적으로 사용하는 높은 수준의 논변을 구성했다고 말했다. 즉, 논변과 같은

인식적 실행에 참여한 학생들이 그들의 인식적 이해가 부족한 것에서 불확실성이 비롯될 수 있음을 인식하는 것은 그들의 일관성 있고 설득력 있는 설명 구성에 도움이 될 수 있다.

불확실성의 유형을 개념적, 인식적인 것으로 나누는 것은 교사가 학생들의 일관된 의미 형성을 개념적, 인식적 차원에서 효과적으로 지원하도록 해준다. 그러나 학생들이 그러한 불확실성에 왜 어려움을 겪는지에 답하기 위해서는 불확실성이 어디에서 비롯되는 것인지, 즉 그 출처(source)를 파악해 보는 접근이 필요하다(Ford & Forman, 2015). Chen *et al.*(2024)은 불확실성의 잠재적인 네 가지 출처로, ‘불충분함(insufficiency), 모호함(ambiguity), 비일관성(incoherence), 충돌(conflict)’을 제시하였다. 네 가지 출처는 학생들의 현상에 대한 기존의 개념적, 인식적 이해가 각각 부족하거나(불충분함), 이해의 의미가 한 가지로 정의되지 않아 불명확하거나(모호함), 새로운 정보와 일관되지 않거나(비일관성), 새로운 정보와 상충하는 것(충돌)으로 정의된다. Chen *et al.*(2024)은 이러한 출처들이 학생들의 의미 형성 과정에서 독립적으로 발생하기보다 종종 얽혀있으며, 얽힘의 정도는 교사가 원하는 수업의 방향에 따라 달라질 수 있다고 설명했다. 예를 들어, 교사가 학생들의 탐구 활동에서 데이터나 결과의 다양한 해석을 강조하는 경우, 인식적 모호함이 수업의 중심이 되어 학생들은 서로 다른 설명을 구성하는 방법에 대해 고민한다. 교사가 데이터를 분석하고 조직하여 일관된 관점을 개발하는 것에 중점을 둘 경우, 인식적 비일관성이 수업의 중심이 되어 학생들은 일관된 증거와 설명을 개발하기 위해 노력한다. 교사가 수업에서 어떤 활동을 의도적으로 설계하고 강조하는가에 따라 학생들은 여러 가지 불확실성의 출처를 동시에 또는 순차적으로 마주한다. 종합하면, 불확실성의 출처를 파악하는 것은 교사가 학생들이 제기한 불확실성을 개념적, 인식적으로 지원하는 것에서 나아가 그러한 불확실성이 개념적이고 인식적인 측면에서 유기적으로 얽혀있음을 알고, 수업의 목표와 방향성을 설정하는 데 도움을 준다.

다. 관계적 불확실성(relational uncertainty)

학생들은 협력적 문제 해결 과정에서 모뎀원 간 역할 분담이나 권력 차이 등과 같은 관계적 요인에 의해 발생하는 불확실성을 마주할 수 있다(Darnon, Doll, & Butera, 2007; Hartner-Tiefenthaler *et al.*, 2018; Jordan & McDaniel, 2014; Kaur & Dasgupta, 2024; Knobloch & Solomon, 2002). 몇몇 연구들은 이를 ‘관계적 불확실성’이라는 용어로 설명하였다(Darnon, Doll, & Butera, 2007; Hartner-Tiefenthaler *et al.*, 2018; Jordan & McDaniel, 2014). 먼저 Jordan & McDaniel(2014)은 로봇 공학 활동을 수행하는 초등학생들이 모뎀원 사이의 역할 분담이나 팀워크에서 비롯된 불확실성을 경험한다고 설명했다. Jordan & McDaniel(2014)에 따르면, 관계적 불확실성은 모뎀에서 각자가 맡은 역할이 명확하지 않거나 누가 어떤 책임을 지는지 확실하지 않을 때, 또는 모뎀원 사이의 명확하지 않은 피드백과 의견 차이로 인해 팀워크가 저해될 때 발생할 수 있다. 그리고 Hartner-Tiefenthaler *et al.*(2018)은 관계적 불확실성이 주로 협력적 지식 구성 과정의 초기 단계에 모뎀원 간 역할 및 책임 분배와 같은 사회적 맥락에서 비롯되며, 언어적 의사소통이나 비언어적 표현을 통한 공감대 형성을 통해 해소될 수 있다고 주장했다. 가장 혁신적인

결과를 낸 모둠의 경우, 과제 초반에 대인 관계의 어려움을 호소했지만, 특정 모둠원이나 모둠 전체가 과제 해결에 얼마나 헌신할 것인지에 대한 의심을 공개적으로 논의하며 상호작용의 규칙을 세워 관계적 불확실성을 극복했다. 반면, 관계적 불확실성을 인지하지 못하거나 회피 또는 무시한 모둠은 낮은 참여도와 성과를 보이며, 개인적 사고 패턴에서 벗어나지 못하고 새로운 것을 탐구하려는 의지를 보이지 않았다(Hartner-Tiefenthaler *et al.*, 2018). Jordan & McDaniel(2014)과 Hartner-Tiefenthaler *et al.*(2018)은 관계적 불확실성을 단순히 관계를 위협하는 요소로 간주하기보다, 상호작용의 어려움을 통해 새로운 지식을 창출할 기회를 제공하는 것으로 여겼다. 종합하면, 관계적 불확실성은 협력적 과학 탐구 과정에서 필연적으로 발생하고, 학생들은 이를 모둠원들과 함께 공개적으로 논의하며 지식 구성에 필요한 공감대를 형성하는 것으로 다룰 수 있어야 한다.

협력적 탐구 과정에 참여하는 학생들이 지식 구성에 대한 서로의 권위와 책임을 ‘협력적 기여자’로 인식하며 관계적 불확실성을 다룰 때(Shim & Kim, 2018), 일관성 있는 의미 형성을 추구할 수 있다. Kaur & Dasgupta(2024)는 협력적 엔지니어링 탐구에 참여한 6학년 학생들이 자신과 상대방을 어떻게 인식하는지, 즉 특정 상황에서 자신과 상대방의 역할이나 의무에 대한 기대를 인식하는 방식에 따라 관계적 불확실성을 생산적 또는 비생산적으로 다룰 수 있다고 제시했다. 예를 들어, 학생들이 모둠 내에서 지식이 더 많거나 영향력이 큰 모둠원을 권위자로 인식하고 나머지는 권위자부터 직접적인 답변과 지시를 받는 보조자로 인식할 때, 관계적 불확실성을 우선순위가 낮은 것으로 다루며 자연하거나 회피하는 모습을 보였다. 반면, 학생들이 서로를 협력적 기여자로 인식할 때, 관계적 불확실성을 더 깊은 이해를 추구하기 위한 기회로 다루며 적극적으로 탐구에 참여하는 모습을 보였다. 즉, 비생산적으로 다뤄진 관계적 불확실성은 상호 간 질문을 제기하고 논리적 토론을 통해 협력적으로 지식을 구성하는 과정에 걸림돌이 될 수 있다. 그러므로 교사는 일관성 있는 의미 형성을 지원하기 위해 학습자가 모둠원의 관점이나 의견을 비롯한 잠재적 역할을 어떻게 인식하는지를 고려할 필요가 있다.

IV. 학생들이 불확실성을 관리하는 과정과 교수 지원 방안

이번 단락에서는 학생들이 과학적 실행에서 불확실성을 제기, 유지 및 감소하며 관리하는 구체적인 과정을 살펴본다. 그리고 학생들의 불확실성 관리를 지원하는 교사들의 딜레마를 소개하고, 이를 바탕으로 학교 과학에 불확실성을 도입하기 위한 교수 지원 방안을 교육과정 설계와 수업 계획 및 실연이라는 두 가지 측면에서 제시한다.

1. 학생들이 불확실성을 제기, 유지 및 감소하며 관리하는 과정

과학 수업에 불확실성을 도입하기 위해서는 먼저 학생들이 지식을 구성하는 인식적 실행 과정에서 불확실성을 어떻게 다루는지를 구체적으로 살펴볼 필요가 있다. 학생들은 논변 담화에 참여하여 개인적으로 내재된 불확실성을 동료들의 명료화 요청이나 대안적 관점에 기반한 반박과 같은 상호작용을 통해 외적으로 표현할 기회를 갖게 된다(Chen, Benus, & Hernandez, 2019; García Carmona & Acevedo-Díaz, 2017; Leitão, 2000). 이에 대해 몇몇 학자들은 학생 개인의 인지

적 수준에서 마주하는 불확실성이 목표 지식과 기존 이해 사이의 인지 갈등이나 부조화(Piaget, 1972)를 통해 야기된다고 설명하며, 이러한 불확실성이 학습의 기회를 만드는데 중요한 자원이 될 수 있다고 주장했다(Hartner-Tiefenthaler *et al.*, 2018; Phillips, 2019; Tiberghien, Cross, & Sensevy, 2014). 그러나 학생 개인의 인지적 수준에서 암묵적으로 불확실성이 유도되었다 할지라도, 이를 외부로 표현하지 않으면 불확실성을 통한 지식 구성의 기회를 마련하는 것은 어려운 것이다. Kirch(2010)와 Manz(2015)에 따르면, 전통적인 과학 수업에서 학생들은 주로 교사로부터 최종적인 형태의 확실한 과학 지식을 전달받는 데 익숙하기 때문에, 과학 지식이 어떻게 발전해 왔는지에 대한 불확실성을 표현하고 경험해 볼 기회를 거의 얻지 못했다. 따라서 우리는 학생들에게 인지적, 사회적 수준에서 불확실성을 명시적으로 표현하도록 지원할 필요가 있다. 학생들은 내면의 암묵적인 불확실성을 제기하고, 제기된 불확실성을 명료화와 평가를 통해 유지하고, 유지된 불확실성에 대한 합의를 도출하여 목표 지식에 통합시킨다(Chen, 2022; Chen, Benus, & Hernandez, 2019; Chen & Techawithayachinda, 2021; Ha, Chen, & Park, 2024; Kaur & Dasgupta, 2024; Kirch, 2010; Metz, 2004). 이와 같은 과정은 실제 논변이나 모델링과 같은 과학적 실행을 안내하는 교사의 지원에 따라 순차적 또는 역동적으로 진행될 수 있다(Chen *et al.*, 2024; Ha, Chen, & Park, 2024). 다음은 지식 구성의 기회를 만드는데 기여한 불확실성 관리의 세 과정을 살펴본 것이다.

먼저, 불확실성 제기 과정에서 학생들은 주어진 현상과 자신들의 대안 개념 사이의 불일치를 인식하고, 자신의 아이디어에서 약점이나 모순점을 드러내며, 과학적 지식을 이해할 필요성을 느낀다(Berland & Hammer, 2012; Chen, Benus, & Hernandez, 2019; Chen & Techawithayachinda, 2021). 이 단계에서 교사는 학생들의 삶과 관련된 현상을 의도적으로 제시하고, 현상에 포함된 실질적인 과학 내용에 대해 학생들이 질문을 제기할 수 있는 맥락을 형성하여 학생들이 동료들의 아이디어를 탐구할 수 있는 공간을 제공한다(Miller *et al.*, 2018; Stroupe, 2014). 이러한 공간에서 학생들은 과학 수업에서 탐구하는 자연현상이 자신의 삶과 연관된 것으로 인식하며 목표 지식에 대한 이해와 더불어 자신의 일상 경험과 아이디어를 불확실성 관리에 주요한 자원으로 인식할 수 있다(Barton & Tan, 2009; Berland & McNeill, 2010).

둘째, 불확실성 유지 과정에서 학생들은 논의를 성급하게 종결하기보다는 데이터와 아이디어를 다면적으로 해석하고 평가하여 주장을 뒷받침하는 풍부한 정당화를 제시할 수 있다(Chen, Benus, & Hernandez, 2019; Chen & Techawithayachinda, 2021; Kirch, 2010; Metz, 2004). 이때, 교사는 모호한 데이터를 확립적으로 해석하는 학생들에게 각자의 해석을 정당화 해보도록 하거나, 상대 주장의 약점을 찾도록 격려하는 등의 방식으로 논의의 성급한 종결(premature closure)을 막을 수 있다(Engle & Conant, 2002). 학생들은 이와 같은 지원을 통해 데이터를 사실적 정보가 아닌 여러 해석과 비판에 열려 있는 것으로 인식하며(Duncan, Chinn, & Barzilai, 2018; McNeill & Berland, 2017), 교사나 지식이 많은 동료의 해석을 그대로 수용하는 피상적이고 표면적인 참여에서 벗어날 수 있다. 자신 또는 상대가 제기한 아이디어의 약점이나 모순점을 평가하는 학생들은 데이터의 질을 고려하고, 경향성을 파악하며, 데이터로부터 일반화된 설명을

구성할 수 있다(Metz, 2004).

마지막으로, 불확실성 감소 과정에서 학생들은 여러 대안적 아이디어에 대한 합의를 도출하고, 유지된 불확실성에 대한 합리적 해결책을 고안하여 그들의 대안 개념과 목표 지식 사이의 간극을 좁힌다(Chen, 2020; Chen, Benus, & Hernandez, 2019). 여기서 교사는 학생들에게 그동안 논의한 내용을 종합하고, 이전 단원에서 배운 내용이나 일상 경험을 그들이 불확실해 하는 것과 의도적으로 연결하여 현상에 대해 일관성 있는 이해를 구축하게 한다(Ha, Chen, & Park, 2024). 학생들은 특정 모듈원이 제기한 질문이나 반박을 무시하여 그가 제기한 불확실성을 무시하기보다(Kaur & Dasgupta, 2024), 여러 관점에서 협력적으로 도출된 해결책을 검토 및 수정하여 불확실성을 해소한다(Ha, Chen, & Park, 2024).

학생들의 불확실성 관리는 제기, 유지, 감소를 통해 이루어지며, 이를 위해서는 각 과정에서 교사의 세심한 지원이 필요하다. 학생들이 마주하는 불확실성은 그들의 과학적 실행을 이끄는 중요한 학습 자원이며, 학생들은 불확실성과 생산적으로 씨름하며 일관된 지식 체계를 협력적으로 발달시키고, 나아가 더 깊은 과학적 이해를 추구하게 된다(Manz, 2015b). 따라서 교사는 학생들이 수업에서 경험하는 불확실성을 인식하고 활용하여 학생들이 진정한 과학적 실행에 안정적으로 참여할 수 있도록 지원할 필요가 있다(Watkins *et al.*, 2018).

2. 학생들의 불확실성 경험을 지원하는 교사의 딜레마

교사들이 과학에서의 불확실성을 가지 있는 것으로 인정하지만(Engle & Conant, 2012; Manz, 2015a, 2015b), 이를 과학 수업에 도입하는 과정에서 교육과정을 따르는 것과 예상치 못한 학생의 아이디어를 따르는 것 사이의 딜레마를 마주한다(Cherbow & McNeill, 2022; Manz & Suárez, 2018; Stroupe, Caballero, & White, 2018; Watkins & Manz, 2022). 우리는 과학 수업에서 학생들이 불확실성을 생산적으로 경험하도록 지원하는 교사들이 겪는 딜레마와 이를 극복한 사례를 다음과 같이 살펴보았다.

첫째, 교사들은 교육과정을 개방하는 과정에서 ‘개입과 물러서기’ 또는 ‘지시와 비지시’ 같은 이분법적 사고에서 비롯된 딜레마를 겪는다. Manz & Suárez(2018)는 초등학교 과학 교사들이 의도적으로 구조화된 활동을 지양하고 탐구 중심의 활동을 강조하는 방향으로 교육 과정을 수정하는 과정에서 자신들의 교육적 개입이나 지시를 완전히 포기하는 것과 같은 불편함을 느낀다는 것을 발견했다. 학생 스스로 주어진 현상을 탐구하도록 강조하는 것은 교사들에게 각각 지시형 교수법과 발견 학습법에서 강조하는 교사의 역할 차이에만 초점을 두도록 오해를 불러일으킬 수 있다(Hmelo-Silver, Duncan, & Chinn, 2007). Manz & Suárez(2018)는 교사들이 위와 같은 불편함을 극복하는데 활용한 세 가지 전략 중 하나로, 복잡한 현상으로 수업을 시작할 것을 제시했다. 교사들은 곤충의 형태와 기능을 학습하는 단원에서 기존의 곤충 키트 수업에 대해 논의한 결과, 독립적인 컵에 놓인 사마귀를 관찰하도록 했던 것에서 복잡한 서식지에 놓인 사마귀를 관찰하는 것으로 수정하였다. 교사들은 학생들이 수정된 수업에서 무엇을 관찰해야 하는지에 대한 구체적인 안내가 없어도 사마귀의 형태와 기능에 주의를 기울이며 적극적으로 질문하게 될 뿐만 아니라, 이러한 질문들을 서식지에 필요한 요소와 연결하는 아이디어를 제시할

것이라고 말했다. 이와 같은 전략은 교사의 개입이나 지시를 단순히 내려놓는 것을 넘어서는 것으로, 학생들은 교사가 의도적으로 설계한 과학 활동에서 복잡한 현상을 탐구하는 과정에 내재된 불확실성을 주도적으로 경험할 기회를 얻게 된다. 더불어 교사들은 학생들이 현상에 대해 의문을 갖고 관찰할 수 있는 공간을 제공하여 학습 목표와 관련된 질문을 생성하는 데 도움을 줄 수 있다.

둘째, 교사들은 협력적인 의미 형성 담화를 지원하는 과정에서 학생 개인의 아이디어를 따라가는 것과 학급 공동체의 학습 목표를 성취하는 것 사이의 긴장감을 마주한다. Watkins & Manz(2022)는 학생 개인이 표현한 불확실성을 교실 공동체의 과학적 대화로 다루는 과정에서 ‘개인의 불확실성에 공간을 허용할 것인지, 그리고 개인의 불확실성을 학급 전체의 문제로 어떻게 전환할 것인지’ 등에 관해 수많은 의사 결정이 필요했음을 보여주었다. 이러한 결정은 개별 학생의 아이디어와 교실 공동체의 학습 목표를 조율하는 과정에서 마주하는 딜레마를 구체적으로 보여준다. 예를 들어, 학생 개인의 불확실성에 공간을 허용할 것인지에 대한 결정은 ‘한 학생이 제기한 불확실성을 학급 전체의 논의 주제로 삼을 것인지’에 대한 것이다. 이것은 학생 개인이 제기한 불확실성(예: 주어진 현상과 학생의 대안 개념 사이의 개념적 충돌)이 유의미하더라도, 나머지 학생들이 문제를 해결할 필요성을 인식하지 못하거나 개념적 충돌에서 비롯되는 불확실성을 이해하지 못할 가능성이 있을 때 발생할 수 있다. 이 사례에서 교사들은 개념적 충돌이나 모순을 학급 전체가 공유할 수 있도록 구체적인 문제 상황을 설정하고, 나머지 학생들이 문제를 인식하고 해결하도록 추가적인 의문을 제기하거나 다양한 가능성을 제시하는 방법으로 딜레마를 극복했다. 교사들은 협력적 의미 형성 과정에서 개별 학생의 불확실성 탐구를 위한 공간을 개방하고, 이를 교실 공동체와 함께 탐구할 수 있도록 조율해 나가는 역량의 함양이 필요하다(Ko & Krist, 2019; Penuel & Reiser, 2018; Stroupe, 2014).

셋째, 교사들은 계획된 교육과정을 따르는 것과 학생들의 관점에서 의미 있는 교육을 하기 위해 교육과정을 재구성하는 것 사이의 긴장감을 겪을 수 있다. Cherbow & McNeill(2022)은 경력 15년 차 교사인 K가 중학교 과학 수업에 대한 인터뷰에서 밝힌 두 가지 걱정을 통해 긴장감을 드러냈다고 설명했다. 교사 K는 사전 인터뷰에서 학생의 아이디어가 준비된 교육과정과 다를 때, 교육과정을 유연하게 운영하는 것과 학문적 목표를 일관성 있게 추구하는 것을 어떻게 조율할지에 대한 걱정을 표현했다. 또한, 그는 학생들이 수업 중 제기한 질문이 이미 학습지나 교재에 인쇄된 것을 발견했을 때, 수업 전체의 방향이 자신들의 관점에서 주도적으로 진행되고 있지 않다고 인식하는 것에 대한 걱정도 언급했다. 사후 인터뷰를 통해 그는 교육과정과 학생 아이디어가 일치하지 않는 순간에는 교육과정을 개방하는 방식으로 유연하게 대처하고, 일치하는 순간에는 인쇄물을 활용하지 않음으로써 학생들의 주인 의식을 부당하게 저해할 가능성을 방지하겠다고 밝혔다. 마찬가지로, Stroupe, Caballero, & White(2018)는 미리 설계된 수업을 진행하는 교사가 실제 수업 현장에서 벌어지는 예기치 못한 상황에서 긴장감을 어떻게 헤쳐나가는지 묘사했다. 실시간으로 이루어지는 학생들과의 상호작용은 수업의 흐름을 변화시켜 계획과 현실 사이의 충돌을 유발할 수 있다. 이때 교사는 수업의 고정된 순서나 경로에 집중하기보다, 학생들의 반응과 참여에 따라 수업의 흐름을 유연하게 변경하는 방식으로 설계하여 즉각적인 상황 변화에 대응

할 줄 알아야 한다(Berland, Russ, & West, 2020; Colley & Windschitl, 2016). 개혁 중심의 교육과정 구현이 요구되는 현시점에서(NRC, 2012; Schwarz, Passmore, & Reiser, 2017), 교사들은 복잡하고 예측할 수 없는 교육의 즉흥적인 상황 안에서 자신만의 창의적인 교수 전략을 활용할 수 있는 역량을 함양해야 할 것이다(Ko & Krist, 2019; Penuel & Reiser, 2018; Stroupe, 2014).

3. 학교 과학에 불확실성을 도입하기 위한 교수 지원 방안

교실과 과학 연구소는 규범을 비롯하여 과학 탐구의 대상과 목표가 매우 다른 환경이다. 그러므로 과학자들의 탐구를 교실에 도입하는 연구자들은 학습 과제에 불확실성을 신중하게 설계해야 한다(Manz, 2018). 몇몇 학자들은 학생들에게 불확실성을 명시적으로 드러내기 위해 과학 탐구에서 모호한 개체를 다뤄보도록 하거나 조사 방법을 개방하였다. 예를 들면, 크립과 모래를 고체 또는 액체로 분류해 보도록 하거나(Varelas *et al.*, 2007), 실험에서 변인을 정의하고 조작하는 방법을 결정해 보도록 하는 것(Ford, 2005; Lehrer & Schauble, 2012)이다. 이와 같은 학습 맥락의 설계는 학생들이 현상을 조사하고 해석하는 여러 가지 방법을 스스로 결정하도록 하여 과학적 이해를 추구할 필요성을 제공한다(Berland & Hammer, 2012; Manz, 2015a, 2015b; Metz, 2008). 다음에서 우리는 학교 과학에서 학생들이 직면할 불확실성을 전략적으로 계획하고, 그러한 불확실성을 인식 및 해결하도록 지원하는 교수 지원 방안을 교육과정 설계와 수업 계획 및 실연이라는 두 가지 측면에서 살펴보았다.

첫째, 교육과정 설계 측면에서 학생들이 불확실성을 명시적으로 관리할 수 있도록 구성된 교육과정 사례를 고려할 필요가 있다. 먼저, Ko & Krist(2019)는 학생이 자연현상을 탐구하며 경험하는 불확실성을 교사와 공유하고 함께 탐색하도록 하는데, 스토리라인 교육과정이 생산적인 교수 자원으로 활용될 수 있다고 언급했다. 스토리라인 교육과정이란 학생들이 질문을 탐색하고, 증거를 수집하고, 점진적으로 아이디어를 구축할 수 있도록 구성된 것을 말한다(Reiser *et al.*, 2021). 불확실성을 학생들의 관점에서 유의미하게 이해할 수 있는 일관된 스토리라인으로 엮을 경우, 교사는 불확실성을 흥미 유발을 위해서만 제기하는 것이 아닌, 심층적 추론을 통해 유지하고, 일관된 지식 체계를 개발하여 감소하는 교수 자원으로 활용할 수 있다. 생산적인 스토리라인의 구현을 통해, 학생들은 자신과 동료 아이디어의 강점 및 약점을 분석하며 다양한 아이디어를 수평적으로 고려하고, 문제화된 현상을 이해하기 위해 일관된 지식을 수직적으로 발전시킨다(Chen & Techawitthayachinda, 2021).

Kervinen & Aivelo(2023)는 시민 과학 프로젝트에 참여한 학생들이 새로운 과학 지식을 구성하는 과정에서 대안 가설을 제시하고, 연구 활동의 목표를 유연하게 재구성하며 불확실성을 논변 실행의 일부로 받아들였음을 제시하였다. 이 논문에서 소개된 시민 과학 프로젝트는 1990년대 일반 시민들이 과학 연구에 참여하여 과학 지식을 생산하는 것을 목표로 개발되었다(Strasser *et al.*, 2019). 몇몇 교사들은 학생들이 과학자와 협력하여 새로운 데이터를 직접 수집하고 분석하는 프로젝트를 통해, 과학 탐구에 내재된 불확실성을 보다 생산적으로 경험할 수 있다고 강조했다(Kervinen & Aivelo, 2023). 특히 시민 과학 프로젝트에 참여한 학생들은 교사나 연구자들도 정답을

미리 알지 못하는 상황에 놓이기 때문에, 기존 지식의 재구성을 목표로 하는 전통적인 과학 교실과 다르게 새로운 과학 지식의 생성을 목표로 한다는 점에서 진정한 과학 실행에 참여할 가능성이 크다(Roth *et al.*, 2008). 학생들은 이러한 프로젝트에서 자신의 지식과 가설을 재평가하고, 새로운 방법론을 모색하고, 데이터를 해석하여 과학적 논증을 구성하며 불확실성을 스스로 관리하게 된다(Kervinen & Aivelo, 2023). 스토리라인이나 시민 과학 프로젝트와 같이 불확실성이 전략적으로 설계된 교육과정은 과학자나 교사가 아닌 학생들의 입장에서 현상을 탐구할 학습 맥락을 제공하며(Lowell, 2024), 학생들이 그들 자신을 ‘이해 안 됨(not-understanding)’으로 위치시키는 데 익숙해지도록 돕는다(Watkins *et al.*, 2018).

둘째, 수업 계획 및 실연 측면에서 학생들이 불확실성을 생산적으로 제기, 유지, 감소하도록 지원하는 구체적인 전략을 참고할 필요가 있다. 교사는 현상을 문제화하는 것(Engle & Conant, 2002; Phillips, Watkins, & Hammer, 2018; Reiser, 2004)을 통해 학생들이 이미 알고 있거나 당연하게 여기는 개념에 대해 의문을 제기하여, 그로 인해 새로운 이해를 형성하도록 지원할 수 있다. Ha, Chen & Park(2024)은 교사가 의미 형성의 시작 단계에서 현상을 문제화하기 위해 탐구 질문(driving question)을 제시하여 학생들이 선행 지식을 탐색하게 하고, 기존 이해에서 비일관성과 불충분함을 확인하여 불확실성을 드러냈다고 설명했다. Chen(2022)은 인간의 호흡계에 대한 모델링 수업에서 교사가 사람의 호흡이라는 현상을 문제화하기 위해 학생들에게 친숙한 일상 언어(예: 진공, 흡입 등)를 사용하여 선행 지식과 목표 개념 사이의 간극을 확인하였음을 보여주었다. 저자는 이러한 간극이 학생 개인뿐만 아니라 서로 다른 학생 사이에서도 나타날 수 있으며, 이것을 명시적으로 드러내고 채울 수 있도록 지원함으로써 교사가 학생들의 불확실성 제기, 유지, 감소를 관리할 수 있다고 말했다.

교사가 학생들에게 권위와 책임을 부여하는 것(Chen, 2020; Engle, 2011; Engle & Conant, 2002)은 학습자가 탐구할 질문을 선택하여 자신의 주장과 탐구 과정에 주도권을 행사하고, 나아가 탐구 결과에 책임을 지도록 하는 것을 의미한다. Forman & Ford(2014)에 따르면, 진정한 대화는 학생들이 대화에 대한 권위와 책임감을 지닐 때, 즉 그들만의 목소리를 낼 수 있을 때 이루어진다. Engle(2011) 및 Engle & Conant(2002)는 교사가 학생들에게 탐구 주제나 질문을 선택하게 하고, 그 질문을 해결하는 과정에서 주도적인 역할을 수행하도록 권위를 부여하는 것과 탐구 결과를 동료들에게 학문적으로 정당화하며 자신의 선택에 책임을 지는 것이 중요하다고 강조했다. Chen(2020)은 생산적으로 불확실성을 관리하는 학생들이 자신이 설정한 탐구 경로에서 권위와 책임을 지니고 있음을 보였다. 즉, 현상을 문제화하는 것은 학습자가 답이 명확하지 않은 문제들에 질문을 제기하도록 하고, 그로 인해 새로운 학습 기회를 만들어내는 불확실성 관리 전략이 될 수 있다(Phillips, Watkins, & Hammer, 2018). 더불어 교사가 학생들에게 권위와 책임을 갖도록 하는 것은 그들의 아이디어가 자원으로 인식되는 대화적 경로에서 주체성을 발휘하도록 하는 전략이 될 수 있다(Stroupe, 2014).

V. 학생들의 인식적 감정과 교사의 인식적 공감

최근 국내외 과학 교육의 주요 문서들은 학생들이 과학적 실행에

직접 참여하여 과학 지식의 구성 과정을 이해하는 것의 중요성을 강조한다(MOE, 2022; NGSS Leads State, 2013; Song *et al.*, 2019). 이는 교사가 학생들에게 과학 내용 지식뿐만 아니라 과학자들이 과학 지식을 구성하는 과정을 이해하도록 지원해야 할 필요성을 제시한다(Berland *et al.*, 2016; Ford, 2008; Stroupe, 2014). 이러한 과학 교육의 비전은 교사들이 단순히 과학을 가르치는 것을 넘어 학생들에게 과학자처럼 생각하고 느끼며 행동할 기회를 제공해야 함을 보여준다(Ford, 2008; Reiser, 2013). 이때, 과학자들이 자연 세계를 탐구하는 과정에서 느끼는 감정은 그들의 학문적 참여에 동기를 부여하는 중요한 요인으로(Jaber & Hammer, 2016a), 현재의 과학 교육 비전에 비추어볼 때 과학적 실행에 참여하는 학생들의 감정에도 주목해 볼 근거를 마련해 준다(Davidson, Jaber, & Southerland, 2020).

과학적 실행에 참여하여 불확실성을 경험하는 학생들은 탐구를 시작하기 전의 기대감, 예상치 못한 결과에 대한 좌절감, 탐구 과정 자체의 즐거움 등과 같은 다양한 감정을 마주한다(Han & Kim, 2018; Jaber & Hammer, 2016b). 이러한 감정은 새로운 아이디어를 떠올릴 때의 흥분감, 자신의 아이디어가 확인되거나 반박되었을 때의 만족감이나 실망감 등 긍정적 감정과 부정적 감정을 모두 포함한다(Oh & Han, 2021). 몇몇 학자들은 학생들이 일반적인 상황에서 느끼는 감정이 아닌, 지식을 구성하고 비판하는 과정에서 느끼는 이와 같은 감정들을 특별히 인식적 감정(epistemic affect)이라 칭하였다(Davidson, Jaber, & Southerland, 2020; Jaber & Hammer, 2016a, 2016b). 인식적 감정은 지식을 추구하는 과정에서 불가피하게 경험하게 되는 호기심, 좌절감, 혼란, 불안감, 흥분 등의 감정을 모두 포함한다. 이에 대해 Engle & Conant(2002)와 Jaber & Hammer(2016b)는 학생들이 표현하는 다양한 인식적 감정이 곧 그들의 학문적 참여의 증거가 될 수 있다는 사례를 제시하였고, Duckworth(2001) 또한 좌절, 신뢰, 즐거움, 흥분 등과 같은 학생들의 인식적 감정이 그들의 과학 탐구에 동기를 부여한다고 주장한 바 있다. 즉, 학생들의 인식적 감정은 과학 탐구의 본질적인 측면으로 그들의 생산적 과학 실행 참여를 반증하는 유용한 렌즈로 활용될 수 있으며, 그들의 안정적이고 지속적인 학문적 참여를 이끄는 원동력을 제공한다.

그러나 그동안 몇몇 연구들은 학생들의 감정을 ‘과학 탐구에 내재된 것’(Jaber & Hammer, 2016a, 2016b; Pierson, Brady, & Lee, 2023)으로 여기기보다, 과학적 실행에 영향을 미치는 외부적 요인으로 간주하였다. 이 점을 비판한 학자들은 감정 연구의 이와 같은 방향이 결과적으로 과학 수업에서 학생들의 학습에 부정적인 영향을 미치는 부정적 감정을 배제하려는 경향으로 나타났음을 지적하였다(Gellert, 2000; Hargreaves, 2000; Jaber, 2015). 예를 들어, Gellert(2000)은 교사들이 수학 학습에 대한 불안과 좌절, 불확실성에 대한 부담감으로부터 학생들을 보호하기 위해 시도한 노력이 결과적으로 학생들의 생산적인 참여와 고뇌의 기회를 제한했다고 설명했다. Jaber(2015) 역시 교사가 초등학교 5학년 학생이 물웅덩이의 증발을 설명하는 데 어려움을 겪는 것을 돕기 위해 개입하려 했던 사례를 소개하며, 학생이 겪을 어려움에 대한 교사의 우려가 오히려 학생에게 중요한 의미 형성의 순간을 방해했을 수 있다고 지적했다. Gellert(2000)와 Jaber(2015)의 사례는 안전한 과학 수업 공간을 위협하는 학생들의 부정적인 감정을 사전에 배제하는 것이 학생들의 인식적 고뇌를 위한 기회를 제한할 수 있다고 언급한 Hargreaves(2000)의 주장과 일맥상통한

다. 따라서 교사들은 학생의 좌절감을 예방하는 것과 같이 인식적 감정을 학문적 본질과 분리된 것으로 다루는 것이 오히려 학습에 방해가 될 수 있음을 인식하고, 학생들이 과학을 수행하는 데 있어 새로운 질문에 직면하거나 아이디어를 구성하려고 애쓸 때 느끼는 불안감이나 짜증과 같은 인식적 감정에 대해 인내심을 갖고 적응하도록 돕는 것이 필요할 것이다(DeBellis & Goldin, 2006).

위와 같이 학생들의 인식적 감정에 주목할 필요성이 대두됨과 동시에, 최근 교사 교육에서 교사가 학생들의 아이디어를 이해하고 대응하는 데 있어 공감 능력의 함양이 필요하다는 주장이 제기되고 있다. Ball(1993)에 따르면, 어린 학생들은 때때로 그들만의 언어를 사용하여 교사의 사고방식과 일치하지 않는 방식으로 아이디어를 표현한다. 이는 교사와 학생 사이에 존재할 수 있는 인식 차이를 보여주는 것으로, 교사는 자신에게 익숙한 관점이 아닌 학생의 관점을 취할 수 있어야 하며, 학생들이 제기하는 아이디어나 질문, 또는 감정이 어떤 의미를 갖는지 이해할 필요가 있다(Sikorski, 2015). 교사가 의미 형성 과정에서 학생들의 인식적, 정서적 경험에 참여하여 그들의 사고방식과 감정을 이해하고 공감하는 능력은 학생들의 아이디어에 주의를 기울이고, 해석하고, 대응하는데 있어 핵심적인 역량으로 꼽힌다(Jaber, 2021). Jaber를 비롯한 몇몇 학자들은 교사의 이와 같은 능력을 인식적 공감(epistemic empathy)이라 일컬으며(Jaber, 2021; Jaber, Dini, & Hammer, 2022; Jaber, Southerland, & Dake, 2018; Lowell, 2024), 교사가 학습자의 지식 구성 경험을 생산적으로 지원하는 데 인식적 공감이 중요한 요인이 될 수 있다고 주장했다. 즉, 교사 교육에서 인식적 공감을 핵심 키워드로 도입할 경우, 교사들은 학생들이 불확실성과 씨름하는 과정에서 느끼는 불안, 좌절, 짜증 등과 같은 여러 불편한 감정들에 공감하고, 학생들이 그러한 감정들을 극복하도록 지원할 수 있다. 동시에, 학생들이 제기한 아이디어가 전통적인 개념이나 교사의 사고방식과 충돌할 때, 교사들은 그것을 배제하기보다 과학 탐구의 생산적 출발점이 되도록 활용할 수 있을 것이다(Ball, 1997).

인식적 공감 능력의 함양을 위해, 교사들은 직접 과학 탐구에 참여하여 자신의 아이디어와 질문을 검증하는 과정에서 느끼는 여러 감정을 반성해 볼 시간을 가져야 한다. 교사들은 성찰을 통해 자신이 세운 가설과 실험 결과가 일치하지 않는 경우에 느끼는 혼란과 좌절, 그리고 동료 교사와의 논변에서 느끼는 긴장감과 같은 그들 내면의 인식적 감정을 마주하고, 익숙해질 수 있다(Davidson, Jaber, & Southerland, 2020). 이러한 인식적 감정에 대한 인지는 교사가 학생들의 다양한 인식적 감정에 진정으로 공감할 수 있는 발판을 마련해 준다(Jaber & Hammer, 2016b; Radoff, Jaber, & Hammer, 2019). 또한, 교사는 과학자들이 연구 과정에서 느끼는 두려움이나 좌절감을 동기 부여와 인내를 위한 계기로 삼는 것과 같은 메타-감정적 경험(meta-affective experience)에 참여해 볼 필요가 있다(Radoff, Jaber, & Hammer, 2019). 과학자들은 도전에 대한 두려움이나 불확실성에 대한 좌절감을 시간이 지남에 따라 오히려 즐기게 되고, 심지어 그러한 감정을 쫓아가며 그들의 연구를 발전시킨다(Jaber & Hammer, 2016b). 즉, 과학자들은 짜증, 두려움, 좌절감과 같은 부정적 감정을 극복해야 할 도전 과제로 인식하며 즐거움이나 성취감으로 재구성하는 메타-감정적 경험에 능숙하다. Davidson, Jaber, & Southerland(2020)는 6주 동안의 과학 연구에 참여한 네 명의 초등 교사가 과학자처럼 메타-감정적 경험에 참여한 사례를 발표했다. 이들 연구에서

교사들은 멘토 과학자 및 동료 교사와의 토론을 통해 그들의 인식적 감정을 정당화하는 방법과 더불어 고난, 불안, 좌절감에 도전했던 경험을 공유하며 이를 극복하는 방법을 터득할 수 있었다고 밝혔다. 종합해 보면, 자신의 인식적 감정을 성찰하고 재구성해 본 교사들은 학생들이 불확실성과 씨름하며 느끼는 불안과 두려움에 더 잘 공감할 수 있으며, 이를 통해 학생들이 과학 탐구 과정에서 마주하는 부정적인 감정들에 인내하고 극복할 수 있도록 지원할 수 있을 것이다.

VI. 결론 및 제언

본 연구에서는 과학 교육 문헌에서 설명하는 불확실성의 의미를 고찰하고, 학생들이 불확실성을 경험하는 과정을 분석하여 학교 과학에 이를 도입하는 방안을 제시하였다. 연구 결과 첫째, 선행 연구에서 불확실성의 의미가 과학 탐구에 내재된 속성으로서 논의됨을 설명하고, 과학적 실행에 참여하는 학생들이 경험하는 불확실성을 개념적, 인식적, 관계적의 세 가지 유형으로 나누어 살펴보았다. 개념적 불확실성은 과학 지식이나 개념에 대한 학생들의 이해가 부족한 경우에 드러나며, 학생들이 선행 지식과 목표 지식 사이의 격차를 인식하도록 돕는다. 따라서 교사는 이를 활용하여 학생들이 선행 지식이나 일상 경험을 학습 주제와 연관 지을 수 있도록 충분히 탐구할 기회를 제공해야 한다. 인식적 불확실성은 학생들이 과학적 아이디어를 구성하는 것에 관한 인식적 이해가 부족한 것에서 비롯될 수 있으며, 교사는 학생들의 인식적 불확실성이 개념적 불확실성과 유기적으로 얽혀 있음을 인식하여 이를 자신의 수업에 적절히 활용해야 한다. 관계적 불확실성은 협력적 탐구 과정에서 학생들 사이의 역할 분담과 같은 상호작용 과정에서 드러나며, 학생들이 이를 생산적으로 다룰 때 일관성 있는 설명 구성으로 이어질 수 있다. 둘째, 학생들이 과학적 실행에서 불확실성을 제기, 유지 및 감소하며 관리하는 구체적인 과정을 파악하고, 이 과정에서 교사들이 겪을 수 있는 딜레마를 설명하였다. 더불어 학교 과학에 불확실성을 도입하는 교수 지원 방안을 교육과정 설계와 수업 계획 및 실연의 두 가지 측면에서 논의하였다. 학생들은 내면의 불확실성을 제기하고, 동료들과 이를 평가하면서 유지하고, 합의를 통해 이를 목표 지식에 통합하여 감소시킨다. 이러한 각 과정은 교사의 세심한 지원을 통해 이루어질 수 있으며, 이때 교사가 겪을 수 있는 딜레마는 다음의 세 가지에서 비롯될 수 있다. ‘교육적 통제와 물러서기’ 같은 이분법적 사고, 학생 개인의 아이디어를 따라가는 것과 학급 공동체의 학습 목표를 추구하는 것 사이의 긴장감, 계획된 교육과정을 따르는 것과 학생 관점에서 의미 있는 교육을 하기 위해 교육과정을 재구성하는 것 사이의 긴장감. 학교 과학에 불확실성을 도입하기 위해서는 불확실성이 전략적으로 설계된 교육과정을 활용하여 학생들이 불확실성에 익숙해질 수 있는 환경을 조성하고, 수업에서 현상을 문제화하거나 학생들에게 권위와 책임감을 부여하여 주체적으로 불확실성을 관리할 수 있도록 지원해야 한다. 셋째, 과학적 실행에서 불확실성을 경험하는 학생들이 느끼는 여러 인식적 감정을 탐색하고, 이에 교사가 인식적으로 공감하는 것의 중요성을 고찰하였다. 학생들은 불확실성을 경험하며 예상치 못한 결과에 대한 좌절감이나 탐구 과정에서의 즐거움과 같은 인식적 감정을 느끼는데, 특히 좌절감과 같은 부정적 감정에 인내심을 갖고 적응할 필요가 있다. 교사들이 탐구 프로젝트에 참여하여 자신의 감정을 성찰하고, 메타-

감정적 경험에 익숙해지는 것은 그들의 인식적 공감 능력 함양에 도움이 될 것이다.

본 연구는 과학 교육에서의 불확실성에 대한 관련 문헌을 이론적으로 고찰한 것으로, 실제 과학 수업에서 불확실성을 도입하고 정착시키고자 하는 향후 연구에 다음과 같이 기여할 수 있을 것이다. 첫째, 불확실성의 다양한 유형을 탐색하고 각각의 불확실성이 비롯되는 출처를 파악하는 연구에 기여할 수 있다. Ford & Forman(2015)은 불확실성 연구의 가장 핵심적인 단계로 “불확실성의 잠재적인 출처를 확인하는 것(p.152)”을 꼽았다. 최근 Chen *et al.*(2024)이 불확실성의 잠재적 출처를 ‘불충분함, 모호함, 비밀관성, 충돌’의 네 가지로 정리한 바 있지만, 이 연구에서 불확실성은 개념적, 인식적의 두 가지 유형으로만 논의되었다. 본 연구는 추후 과학적 실행에서 학생들이 경험하는 불확실성의 의미를 파악하기 위해 불확실성의 유형을 추가로 탐색하는 것과 더불어, 각각의 불확실성이 어디에서 비롯되는 것인지 그 출처를 밝히는 연구에 일조할 것이다. 둘째, 과학 수업에 불확실성을 적용하고자 하는 교사들의 전문성 개발 연구에 기여할 수 있다. 교사들이 불확실성의 가치를 인정함에도 불구하고(Manz, 2015a, 2015b), 실제 그들의 과학 수업에 이를 적용하는 것은 시행착오와 어려움이 따른다. 본 연구에서 논의한 교사들의 세 가지 딜레마는 교사들이 수업 현장에서 학생들의 불확실성 경험을 생산적으로 이끄는 과정에서 마주할 수 있는 실제적인 어려움과 그것을 극복할 수 있는 구체적인 전략을 제공한다. 또한, 교육과정 및 수업 설계 단계에서 교사가 불확실성 도입 및 정착을 위한 방안을 고려하는 것은 교육의 예측 불가능한 특성에 대비하여 자신만의 교수 전략을 갖추도록 하는 데 도움이 될 수 있다. 마지막으로, 학생들의 과학 탐구에 내재된 감정적 측면을 탐색하고, 부정적 감정을 극복하여 탐구의 원동력으로 삼는 메타-감정적 경험을 조망하는 연구에 기여할 수 있다. 최근 학생들의 감정이 과학 탐구에 영향을 미치는 외부 요인이자기보다 과학 탐구의 본질로서 학생들의 생산적 참여를 이끄는 원동력이라는 주장이 제기되고 있다(Jaber & Hammer, 2016a, 2016b; Pierson, Brady, & Lee, 2023). 그리고 Jaber와 동료 학자들은 교사가 학생들의 인식적, 정서적 경험에 참여하여 그들의 사고방식과 감정에 공감하려면, 과학자들의 메타-감정적 경험에 익숙해질 필요가 있다고 주장한다(Davidson, Jaber, & Southerland, 2020; Radoff, Jaber, & Hammer, 2019). 본 연구는 이와 같은 주장에 동의하며, 학생들이 불확실성을 경험하며 느끼는 부정적 감정을 일관성 있는 의미 형성의 계기로 삼는 메타-감정적 경험을 구체적으로 밝히는 데 마중물이 될 것이다.

국문요약

본 연구의 목적은 문헌 분석을 통해 과학 교육에서 불확실성의 의미를 탐색하고, 학생들이 경험하는 불확실성의 과정을 고찰하여 학교 과학에 불확실성을 도입하는 방안을 제시하는 것이다. 이에 따라 관련 선행 연구를 분석한 결과, 과학 탐구에 내재된 불확실성, 학생들이 불확실성을 관리하는 과정과 교수 지원 방안, 학생들의 인식적 감정과 교사의 인식적 공감이라는 세 가지 주요 주제가 선정되었다. 첫 번째 주제는 과학 교육에서 불확실성의 의미를 파악한 것으로, 과학자들의 탐구에 내재된 속성으로서의 불확실성과 더불어 학생들이 경험하는 불확실성을 개념적, 인식적, 관계적 유형으로 나누어 고

찰하였다. 두 번째 주제는 학생들이 불확실성을 관리하는 구체적인 과정과 그에 따른 교수 지원 방안을 제시한다. 학생들은 불확실성을 제기, 유지 및 감소하는 과정을 통해 관리하며, 이 과정에서 교사는 '교육적 통제와 물러서기' 같은 이분법적 사고, 학생 개인의 아이디어를 따라가는 것과 학급 공동체의 학습 목표를 추구하는 것 사이의 긴장감, 계획된 교육과정을 따르는 것과 학생 관점에서 의미 있는 교육을 하기 위해 교육과정을 재구성하는 것 사이의 긴장감에서 비롯된 딜레마를 겪는다. 이에 따른 교수 지원 방안이 교육과정 설계와 수업 계획 및 실연이라는 두 가지 측면에서 논의되었다. 세 번째 주제는 학생들의 불확실성 경험을 감정적 측면에서 조명하는 것으로, 학생들이 불확실성을 경험하며 느끼는 여러 인식적 감정을 탐색하고, 이에 공감할 줄 아는 교사의 전문성 함양이 필요함을 논의하였다. 본 연구는 학교 현장에 불확실성을 도입하여 안정적으로 정착시키고자 하는 향후 연구에 기여할 수 있으며, 이를 실행하는 예비 교사를 비롯한 교사 및 교사 교육자들에게 구체적인 방향성을 제시한다.

주제어 : 불확실성 유형, 불확실성 관리(제기 · 유지 · 감소), 인식적 감정

References

- 장하석. (2015). *장하석의 과학, 철학을 만나다*. 서울: 지식플러스.
- Babrow, A. S., & Matthias, M. S. (2015). Generally unseen challenges in uncertainty management: An application of problematic integration theory. In *Uncertainty, information management, and disclosure decisions* (pp. 9-25). Routledge.
- Ball, D. L. (1993). With an eye on the mathematical horizon: Dilemmas of teaching elementary school mathematics. *The Elementary School Journal*, 93(4), 373-397.
- Ball, D. L. (1997). What do students know? Facing challenges of distance, context, and desire in trying to hear children. In *International handbook of teachers and teaching* (pp. 769-818). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Barton, A. C., & Tan, E. (2009). Funds of knowledge and discourses and hybrid space. *Journal of Research in Science Teaching: The Official Journal of the National Association for Research in Science Teaching*, 46(1), 50-73.
- Beghetto, R. A. (2017). Inviting uncertainty into the classroom. *Educational Leadership*, 75(2), 20-25.
- Bellocchi, A. (2018). Negative emotional events during science inquiry. In *Eventful Learning* (pp. 87-104). Brill.
- Bellocchi, A., & Ritchie, S. M. (2015). "I was proud of myself that I didn't give up and I did it": Experiences of pride and triumph in learning science. *Science Education*, 99(4), 638-668.
- Berland, L. K., & Hammer, D. (2012). Students' framings and their participation in scientific argumentation. *Perspectives on scientific argumentation: Theory, practice and research*, 73-93.
- Berland, L. K., & McNeill, K. L. (2010). A learning progression for scientific argumentation: Understanding student work and designing supportive instructional contexts. *Science Education*, 94(5), 765-793.
- Berland, L. K., & Reiser, B. J. (2011). Classroom communities' adaptations of the practice of scientific argumentation. *Science Education*, 95(2), 191-216.
- Berland, L. K., Russ, R. S., & West, C. P. (2020). Supporting the scientific practices through epistemologically responsive science teaching. *Journal of Science Teacher Education*, 31(3), 264-290.
- Berland, L. K., Schwarz, C. V., Krist, C., Kenyon, L., Lo, A. S., & Reiser, B. J. (2016). Epistemologies in practice: Making scientific practices meaningful for students. *Journal of Research in Science Teaching*, 53(7), 1082-1112.
- Blumenfeld, P. C., Mergendoller, J. R., & Swarthout, D. W. (1987). Task as a heuristic for understanding student learning and motivation. *Journal of Curriculum Studies*, 19(2), 135-148.
- Buck, Z. E., Lee, H. S., & Flores, J. (2014). I am sure there may be a planet there: Student articulation of uncertainty in argumentation tasks. *International Journal of Science Education*, 36(14), 2391-2420.
- Chen, Y. C. (2020). Dialogic pathways to manage uncertainty for productive engagement in scientific argumentation: A longitudinal case study grounded in an ethnographic perspective. *Science & Education*, 29(2), 331-375.
- Chen, Y. C. (2021). Is Uncertainty a Barrier or Resource to Advance Science? The Role of Uncertainty in Science and Its Implications for Science Teaching and Learning. *Science & Education*, 31(2), 543-549.
- Chen, Y. C. (2022). Epistemic uncertainty and the support of productive struggle during scientific modeling for knowledge co-development. *Journal of Research in Science Teaching*, 59(3), 383-422.
- Chen, Y. C. (2024). Cultivating a higher level of student agency in collective discussion: teacher strategies to navigate student scientific uncertainty to develop a trajectory of sensemaking. *International Journal of Science Education*, 1-34. <https://doi.org/10.1080/09500693.2024.2333714>
- Chen, Y. C., Benus, M. J., & Hernandez, J. (2019). Managing uncertainty in scientific argumentation. *Science Education*, 103(5), 1235-1276.
- Chen, Y. C., & Jordan, M. (2024). Student Uncertainty as a Pedagogical Resource (SUPeR) approach for developing a new era of science literacy: practicing and thinking like a scientist. *Science Activities*, 61(1), 1-15.
- Chen, Y. C., Jordan, M., Park, J., & Starrett, E. (2024). Navigating student uncertainty for productive struggle: Establishing the importance for and distinguishing types, sources, and desirability of scientific uncertainties. *Science Education*, 108(4), 1099-1133.
- Chen, Y. C., & Qiao, X. (2020). Using students' epistemic uncertainty as a pedagogical resource to develop knowledge in argumentation. *International Journal of Science Education*, 42(13), 2145-2180.
- Chen, Y. C., & Techawitthayachinda, R. (2021). Developing deep learning in science classrooms: Tactics to manage epistemic uncertainty during whole-class discussion. *Journal of Research in Science Teaching*, 58(8), 1083-1116.
- Cherbow, K., & McNeill, K. L. (2022). Planning for student-driven discussions: A revelatory case of curricular sensemaking for epistemic agency. *Journal of the Learning Sciences*, 31(3), 408-457.
- Colley, C., & Windschitl, M. (2016). Rigor in elementary science students' discourse: The role of responsiveness and supportive conditions for talk. *Science Education*, 100(6), 1009-1038.
- Darnon, C., Doll, S., & Butera, F. (2007). Dealing with a disagreeing partner: Relational and epistemic conflict elaboration. *European Journal of Psychology of Education*, 22(3), 227-242.
- Davidson, S. G., Jaber, L. Z., & Southerland, S. A. (2020). Emotions in the doing of science: Exploring epistemic affect in elementary teachers' science research experiences. *Science Education*, 104(6), 1008-1040.
- DeBellis, V. A., & Goldin, G. A. (2006). Affect and meta-affect in mathematical problem solving: A representational perspective. *Educational Studies in Mathematics*, 63(2), 131-147.
- Doyle, W., & Carter, K. (1984). Academic tasks in classrooms. *Curriculum Inquiry*, 14(2), 129-149.
- Duckworth, E. (Ed.). (2001). *Tell me more: Listening to learners explain*. Teachers College Press.
- Duncan, R. G., Chinn, C. A., & Barzilay, S. (2018). Grasp of evidence: Problematizing and expanding the next generation science standards' conceptualization of evidence. *Journal of Research in Science Teaching*, 55(7), 907-937.
- Duschl, R. A., & Osborne, J. (2002). Supporting and promoting argumentation discourse in science education. *Studies in Science Education*, 38(1), 39-72.
- Engle, R. A. (2011). The productive disciplinary engagement framework: Origins, key concepts, and developments. In *Design research on learning and thinking in educational settings*. New York, NY: Routledge.
- Engle, R. A., & Conant, F. R. (2002). Guiding principles for fostering productive disciplinary engagement: Explaining an emergent argument in a community of learners classroom. *Cognition and Instruction*, 20(4), 399-483.
- Ford, M. J. (2005). The game, the pieces, and the players: Generative resources from two instructional portrayals of experimentation. *Journal of the Learning Sciences*, 14(4), 449-487.
- Ford, M. (2008). Disciplinary authority and accountability in scientific practice and learning. *Science Education*, 92(3), 404-423.
- Ford, M. J., & Forman, E. A. (2006). Chapter 1: Redefining disciplinary learning in classroom contexts. *Review of Research in Education*, 30(1), 1-32.
- Ford, M. J., & Forman, E. A. (2015). Uncertainty and scientific progress in classroom dialogue. *Socializing intelligence through academic talk and dialogue* (pp. 143-156). Washington, DC: American Educational Research Association.
- Forman, E. A., & Ford, M. J. (2014). Authority and accountability in light of disciplinary practices in science. *International Journal of Educational*

- Research, 64, 199-210.
- García-Carmona, A., & Acevedo-Díaz, J. A. (2017). Understanding the nature of science through a critical and reflective analysis of the controversy between Pasteur and Liebig on fermentation. *Science & Education, 26*, 65-91.
- Gellert, U. (2000). Mathematics instruction in safe space: Prospective elementary teachers' views of mathematics education. *Journal of Mathematics Teacher Education, 3*(3), 251-270.
- Gill, E. A., & Babrow, A. S. (2007). To hope or to know: Coping with uncertainty and ambivalence in women's magazine breast cancer articles. *Journal of Applied Communication Research, 35*(2), 133-155.
- Gooding, D. (1990). *Science and Philosophy: Experiment and the Making of Meaning*. Kluwer.
- Ha, H., Chen, Y. C., & Park, J. (2024). Teacher strategies to support student navigation of uncertainty: Considering the dynamic nature of scientific uncertainty throughout phases of sensemaking. *Science Education, 108*(3), 890-928.
- Ha, H., Park, J., & Chen, Y. C. (2024). Conceptualizing phases of sensemaking as a trajectory for grasping better understanding: Coordinating student scientific uncertainty as a pedagogical resource. *Research in Science Education, 54*(3), 359-391.
- Hammer, D. (2000). Student resources for learning introductory physics. *American Journal of Physics, 68*(S1), S52-S59.
- Han, M., & Kim, H. B. (2018). An introverted elementary student's construction of epistemic affect during modeling participation patterns. *Journal of the Korean Association for Science Education, 38*(2), 171-186.
- Hargreaves, A. (2000). Mixed emotions: Teachers' perceptions of their interactions with students. *Teaching and Teacher Education, 16*(8), 811-826.
- Hartner-Tiefenthaler, M., Roetzer, K., Bottaro, G., & Peschl, M. F. (2018). When relational and epistemological uncertainty act as driving forces in collaborative knowledge creation processes among university students. *Thinking Skills and Creativity, 28*, 21-40.
- Henningsen, M., & Stein, M. K. (1997). Mathematical tasks and student cognition: Classroom-based factors that support and inhibit high-level mathematical thinking and reasoning. *Journal for Research in Mathematics Education, 28*(5), 524-549.
- Herbst, P. G. (2003). Using novel tasks in teaching mathematics: Three tensions affecting the work of the teacher. *American Educational Research Journal, 40*(1), 197-238.
- Hmelo-Silver, C. E., Duncan, R. G., & Chinn, C. A. (2007). Scaffolding and achievement in problem-based and inquiry learning: a response to Kirschner, Sweller, and Ed. *Educational Psychologist, 42*(2), 99-107.
- Horsthemke, K. (2015). Epistemic empathy in childrearing and education. *Ethics and Education, 10*(1).
- Hutchison, P., & Hammer, D. (2010). Attending to student epistemological framing in a science classroom. *Science Education, 94*(3), 506-524.
- Jaber, L. Z. (2015). Attending to students' epistemic affect. In *Responsive teaching in science and mathematics* (pp. 162-188). Routledge.
- Jaber, L. Z. (2021). "He got a glimpse of the joys of understanding"—The role of epistemic empathy in teacher learning. *Journal of the Learning Sciences, 30*(3), 433-465.
- Jaber, L. Z., Dini, V., & Hammer, D. (2022). "Well that's how the kids feel!"—Epistemic empathy as a driver of responsive teaching. *Journal of Research in Science Teaching, 59*(2), 223-251.
- Jaber, L. Z., & Hammer, D. (2016a). Engaging in science: A feeling for the discipline. *Journal of the Learning Sciences, 25*(2), 156-202.
- Jaber, L. Z., & Hammer, D. (2016b). Learning to feel like a scientist. *Science Education, 100*(2), 189-220.
- Jaber, L. Z., Southerland, S., & Dake, F. (2018). Cultivating epistemic empathy in preservice teacher education. *Teaching and Teacher Education, 72*, 13-23.
- Jiménez-Aleixandre, M., Rodríguez, A., & Duschl, R. (2000). "Doing the lesson" or "doing science": Argument in high school genetics. *Science Education, 84*(6), 757-792.
- Jordan, M. E., & McDaniel Jr, R. R. (2014). Managing uncertainty during collaborative problem solving in elementary school teams: The role of peer influence in robotics engineering activity. *Journal of the Learning Sciences, 23*(4), 490-536.
- Kampourakis, K., & McCain, K. (2019). *Uncertainty: How it makes science advance*. Oxford University Press.
- Kapur, M. (2016). Examining productive failure, productive success, unproductive failure, and unproductive success in learning. *Educational Psychologist, 51*(2), 289-299.
- Kapur, M., & Bielaczyc, K. (2012). Designing for productive failure. *Journal of the Learning Sciences, 21*(1), 45-83.
- Kaur, N., & Dasgupta, C. (2024). Investigating the interplay of epistemological and positional framing during collaborative uncertainty management. *Journal of the Learning Sciences, 33*(1), 80-124.
- Kelly, G. J., & Licona, P. (2018). Epistemic practices and science education. *History, philosophy and science teaching: New perspectives, 139-165*.
- Kervinen, A., & Aivelo, T. (2023). Secondary school students' responses to epistemic uncertainty during an ecological citizen science inquiry. *Science Education, 107*(5), 1352-1379.
- Kervinen, A., Roth, W. M., Juuti, K., & Uitto, A. (2020). "How stupid can a person be?"—Students coping with authoritative dimensions of science lessons. *Learning, Culture and Social Interaction, 24*, 100367.
- Kirch, S. A. (2010). Identifying and resolving uncertainty as a mediated action in science: A comparative analysis of the cultural tools used by scientists and elementary science students at work. *Science Education, 94*(2), 308-335.
- Kirch, S. A., & Siry, C. A. (2012). "Maybe the algae was from the filter": Maybe and similar modifiers as mediational tools and indicators of uncertainty and possibility in children's science talk. *Research in Science Education, 42*, 261-280.
- Knobloch, L. K., & Solomon, D. H. (2002). Information seeking beyond initial interaction: Negotiating relational uncertainty within close relationships. *Human Communication Research, 28*(2), 243-257.
- Ko, M. L. M., & Krist, C. (2019). Opening up curricula to redistribute epistemic agency: A framework for supporting science teaching. *Science Education, 103*(4), 979-1010.
- Ko, M. L. M., & Luna, M. J. (2024). The glue that makes it "hang together": A framework for identifying how metadiscourse facilitates uncertainty navigation during knowledge building discussions. *Journal of Research in Science Teaching, 61*(2), 457-486.
- Latour, B. (1987). *Science in action: How to follow scientists and engineers through society*. Harvard university press.
- Lee, H., Lee, H., & Zeidler, D. L. (2020). Examining tensions in the socioscientific issues classroom: Students' border crossings into a new culture of science. *Journal of Research in Science Teaching, 57*(5), 672-694.
- Lee, H. S., Liu, O. L., Pallant, A., Roohr, K. C., Pryputniewicz, S., & Buck, Z. E. (2014). Assessment of uncertainty-infused scientific argumentation. *Journal of Research in Science Teaching, 51*(5), 581-605.
- Lee, H. S., Pallant, A., Pryputniewicz, S., Lord, T., Mulholland, M., & Liu, O. L. (2019). Automated text scoring and real-time adjustable feedback: Supporting revision of scientific arguments involving uncertainty. *Science Education, 103*(3), 590-622.
- Lehrer, R., & Schauble, L. (2012). Seeding evolutionary thinking by engaging children in modeling its foundations. *Science Education, 96*(4), 701-724.
- Lemke, J. L. (1990). *Talking science: Language, learning, and values*. Norwood, NJ: Ablex.
- Lenzer, S., Smarsly, B., & Graulich, N. (2020). How do students become experts? An in-depth study on the development of domain-specific awareness in a materials chemistry course. *International Journal of Science Education, 42*(12), 2032-2054.
- Lopes, E. (2010). Learning under uncertainty: A grounded theory study. In N. Reynolds, & M. Turcsányi-Szabó (Eds.), *Key competencies in the knowledge society. KCKS 2010. IFIP advances in Information and communication Technology* (Vol 324, pp. 246-256). Springer.
- Lowell, B. R. (2024). The student hat in professional development: Building epistemic empathy to support teacher learning. *Science Education, 108*(2), 581-607.
- Manz, E. (2015a). Representing student argumentation as functionally emergent from scientific activity. *Review of Educational Research, 85*(4), 553-590.
- Manz, E. (2015b). Resistance and the development of scientific practice: Designing the mangle into science instruction. *Cognition and Instruction, 33*(2), 89-124.
- Manz, E. (2018). Designing for and Analyzing Productive Uncertainty in Science Investigations. In ICLS.
- Manz, E., Lehrer, R., & Schauble, L. (2020). Rethinking the classroom science investigation. *Journal of Research in Science Teaching, 57*(7), 1148-1174.
- Manz, E., & Suárez, E. (2018). Supporting teachers to negotiate uncertainty for science, students, and teaching. *Science Education, 102*(4), 771-795.
- McNeill, K. L., & Berland, L. (2017). What is (or should be) scientific evidence use in k-12 classrooms?. *Journal of Research in Science Teaching, 54*(5), 672-689.
- Metz, K. E. (2004). Children's understanding of scientific inquiry: Their conceptualization of uncertainty in investigations of their own design. *Cognition and Instruction, 22*(2), 219-290.
- Metz, K. E. (2008). Narrowing the gulf between the practices of science and the elementary school science classroom. *The Elementary School Journal, 109*(2), 138-161.

- Miller, E., Manz, E., Russ, R., Stroupe, D., & Berland, L. (2018). Addressing the epistemic elephant in the room: Epistemic agency and the next generation science standards. *Journal of Research in Science Teaching*, 55(7), 1053-1075.
- Ministry of Education (MOE). (2022). The 2022 revised national science curriculum. Sejong: Ministry of Education.
- National Research Council (NRC). (2012). A framework for K-12 science education: Practices, crosscutting concepts, and core ideas. National Academies Press.
- NGSS Lead States (2013). The Next Generation Science Standards: For states, by states. Washington, DC: National Academies Press.
- Oh, P. S., & Han, M. (2021). A review of the history of and recent trends on emotion research in science education. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 41(2), 103-114.
- Pallant, A., & Lee, H. S. (2015). Constructing scientific arguments using evidence from dynamic computational climate models. *Journal of Science Education and Technology*, 24, 378-395.
- Park, J., Yuli, D., Garima, A., Ratrapee, T., Ying-Chih, C., Dijiang, H., & Huan, L. (2023, April). Development and Validation of the Uncertainty Management in Problem-Based Learning Scale in Postsecondary STEM Education. In Annual Meeting of the American Educational Research Association 2023.
- Penuel, W. R., & Reiser, B. J. (2018). Designing NGSS-aligned curriculum materials. Committee to Revise America's Lab Report, 1-51.
- Phillips, A. M. (2019). Problematizing as "Doing Physics": The Importance of Articulating, Refining, and Motivating Problems in Classrooms (Doctoral dissertation, Tufts University).
- Phillips, A. M., Watkins, J., & Hammer, D. (2017). Problematizing as a scientific endeavor. *Physical Review Physics Education Research*, 13(2), 020107.
- Piaget, J. (1972). Intellectual evolution from adolescence to adulthood. *Human Development*, 15, 1-12.
- Pickering, A. (1995). *The Mangle of Practice: Time, Agency, and Science*. University of Chicago Press.
- Pierson, A. E., Brady, C. E., & Lee, S. J. (2023). Emotional configurations in STEM classrooms: Braiding feelings, sensemaking, and practices in extended investigations. *Science Education*, 107(5), 1126-1162.
- Radinsky, J. (2008). Students' roles in group-work with visual data: A site of science learning. *Cognition and Instruction*, 26(2), 145-194.
- Radoff, J., Jaber, L. Z., & Hammer, D. (2019). "It's scary but it's also exciting": Evidence of meta-affective learning in science. *Cognition and Instruction*, 37(1), 73-92.
- Rapkiewicz, J., Park, J., Chen, Y. C., & Jordan, M. E. (2023). Student uncertainty as a pedagogical resource [SUPeR]: Using the SUPeR approach to investigate electromagnetic force. *Science Scope*, 46(7), 24-31.
- Reiser, B. J. (2004). Scaffolding Complex Learning: The Mechanisms of Structuring and Problematizing Student Work. *The Journal of The Learning Sciences*, 13(3), 273-304.
- Reiser, B. J., Novak, M., McGill, T. A., & Penuel, W. R. (2021). Storyline units: An instructional model to support coherence from the students' perspective. *Journal of Science Teacher Education*, 32(7), 805-829.
- Retzbach, J., Otto, L., & Maier, M. (2016). Measuring the perceived uncertainty of scientific evidence and its relationship to engagement with science. *Public Understanding of Science*, 25(6), 638-655.
- Roth, W.-M., Van Eijck, M., Reis, G., & Hsu, P.-L. (2008). *Authentic science revisited: In praise of diversity, heterogeneity, hybridity*. Brill.
- Ryu, S., & Sandoval, W. A. (2012). Improvements to elementary children's epistemic understanding from sustained argumentation. *Science Education*, 96(3), 488-526.
- Schwarz, C. V., Passmore, C., & Reiser, B. J. (2017). Moving beyond "knowing about" science to making sense of the world. Helping students make sense of the world using next generation science and engineering practices (pp. 3-21.). NSTA Press.
- Shim, S. Y., & Kim, H. B. (2018). Framing negotiation: Dynamics of epistemological and positional framing in small groups during scientific modeling. *Science Education*, 102(1), 128-152.
- Sikorski, T. R. (2015). Understanding responsive teaching and curriculum from the students' perspective. In *Responsive teaching in science and mathematics* (pp. 85-104). Routledge.
- Song, J., Kang, S., Kwak, Y., Kim, D., Kim, S., Na, J., Do, J., Min, B., Park, S., Bae, S., Son, Y., Son, J., Oh, P., Lee, J., Lee, H., Lim, H., Jung, D., Jung, J., Kim, J., & Jung, Y. (2019). Contents and features of 'Korean science education standards (KSES)' for the next generation. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 39(3), 465-478.
- Starrett, E., Jordan, M., Chen, Y. C., Park, J., & Meza-Torres, C. (2024). Desirable uncertainty in science teaching: Exploring teachers' perceptions and practice of using student scientific uncertainty as a pedagogical resource. *Teaching and Teacher Education*, 140, 104456.
- Strasser, B., Baudry, J., Mahr, D., Sanchez, G., & Tancoigne, E. (2019). "Citizen science"? Rethinking science and public participation. *Science & Technology Studies*, 32, 52-76.
- Stroupe, D. (2014). Examining classroom science practice communities: How teachers and students negotiate epistemic agency and learn science-as-practice. *Science Education*, 98(3), 487-516.
- Stroupe, D., Caballero, M. D., & White, P. (2018). Fostering students' epistemic agency through the co-configuration of moth research. *Science Education*, 102(6), 1176-1200.
- Tiberghien, A., Badreddine, Z., & Cross, D. (2018). Designing teacher education and professional development activities for science learning. Professional development for inquiry-based science teaching and learning, 245-259.
- Tiberghien, A., Cross, D., & Sensevy, G. (2014). The evolution of classroom physics knowledge in relation to certainty and uncertainty. *Journal of Research in Science Teaching*, 51(7), 930-961.
- Tomas, L., Rigano, D., & Ritchie, S. M. (2016). Students' regulation of their emotions in a science classroom. *Journal of Research in Science Teaching*, 53(2), 234-260.
- VanLehn, K., Siler, S., Murray, C., Yamauchi, T., & Baggett, W. B. (2003). Why do only some events cause learning during human tutoring?. *Cognition and Instruction*, 21(3), 209-249.
- Varelas, M., Pappas, C. C., Kane, J. M., Arsenault, A., Hankes, J., & Cowan, B. M. (2007). Urban primary-grade children think and talk science: Curricular and instructional practices that nurture participation and argumentation. *Science Education*, 92(1), 65-95.
- Warshauer, H. K. (2015). Productive struggle in middle school mathematics classrooms. *Journal of Mathematics Teacher Education*, 18, 375-400.
- Watkins, J., Hammer, D., Radoff, J., Jaber, L. Z., & Phillips, A. M. (2018). Positioning as not-understanding: The value of showing uncertainty for engaging in science. *Journal of Research in Science Teaching*, 55(4), 573-599.
- Watkins, J., & Manz, E. (2022). Characterizing pedagogical decision points in sense-making conversations motivated by scientific uncertainty. *Science Education*, 106(6), 1408-1441.
- Zaslavsky, O. (2005). Seizing the opportunity to create uncertainty in learning mathematics. *Educational Studies in Mathematics*, 60, 297-321.

저자정보

이정화(서울대학교 학생)
 심수연(서울대학교 교수)