

열화상 사진기로 열전도 현상을 시각화한 자료가 소집단 활동에서 초등학생에게 미치는 교육적 효과 - 금속이 차갑게 느껴지는 이유에 대한 정신모형 변화를 중심으로 -

이가람 · 주은정 · 박일우[†]

The Educational Effect of the Visualization of Heat Conduction with a Thermal Imaging Camera on Elementary School Students in Small Group Activity - Focusing on the Change of the Mental Model of Why Metal Feels Cold -

Lee, Ga Ram · Ju, Eunjeong · Park, Il-Woo[†]

국문 초록

본 연구는 ‘금속이 차갑게 느껴지는 이유’를 설명하는 소집단 활동 과정에서 열화상 사진기로 열전도 현상을 시각화한 자료가 초등학생에게 미치는 교육적 효과에 대해서 알아보고자 하였다. 연구를 위해 초등 5학년 4명을 대상으로 ‘온도와 열’ 단원 학습 전후에 사전 사후 심층면담을 진행하였다. 또한 ‘금속이 차갑게 느껴지는 이유’를 설명하는 추가 차시 수업의 소집단 활동 과정에서 녹화 및 녹음 자료, 학생들의 활동지, 연구자의 연구일지 등을 수집하여, 비교·검토하였다. 연구 결과 열화상 사진기로 열전도 현상을 시각화한 자료는 호기심을 유발하고 정교한 관찰 및 통합적 사고의 기회를 제공하였다. 또한 열전도 현상을 시각화한 자료는 학생들의 소집단 활동 과정에서 활발한 의사소통을 위한 해석과 반박의 근거자료로 사용되었다. 학생들은 열화상 동영상 자료를 바탕으로 하는 소집단 토론 과정을 통해 비과학적 신념을 변화시키고 지식을 정교화하였으며 이를 바탕으로 각자의 정신모형을 발달시켰다.

주제어: 시각화, 열전도, 열화상 사진기, 정신모형, 초등학생

ABSTRACT

This study aims to investigate the educational effects of the visualization of heat conduction using a thermal imaging camera on elementary school students through small group activities. It endeavors to explain the reason for why metal feels cold. The scholars conducted in-depth interviews before and after learning the unit “Temperature and Heat” for four students in fifth grade in Seoul. Recorded video and audio materials of the activities, their outputs, and journals of scholars were collected, reviewed, and analyzed. The result demonstrated that visualizing heat conduction using the thermal imaging camera aroused curiosity and provided an opportunity for sophisticated observation and integrated thinking. In addition, the visualization of the heat conduction phenomenon was used as the basis for interpretation and rebuttal for active communication during the small group activities of the students. Consequently, the students changed their non-scientific beliefs, refined their knowledge, and developed their mental models through a small group discussion based on a thermal image video.

Key words: elementary school student, heat conduction, mental model, thermal imaging camera, visualization

이 논문은 제1저자의 2022년도 박사학위 논문 일부를 수정·보완한 것임.

2022.07.26(접수), 2022.08.10(1심통과), 2022.08.22(2심통과), 2022.08.22(최종통과)

E-mail: iwpark@snu.ac.kr(박일우)

I. 서론

우리나라와 서구권의 ‘백문이 불여일견(百聞不如一見)’, ‘Seeing is believing’이라는 속담은 시각 정보가 인간의 이해와 믿음에 얼마나 큰 영향을 주는지를 잘 표현해 준다. 관찰을 통한 객관적 지식을 중시한 베이컨이 서구 근대과학의 전통을 확립한 이래 관찰 도구의 혁신 등 기술 발전과 맞물린 시각적 관찰과 발견은 근대과학의 비약적 발전을 이끄는 원동력이었다(이정희, 2009; Galison, 1997). Van Helden (1977)은 우수한 관찰 도구를 과학자의 관찰 능력 및 지식과 더불어 과학적 사실 발견을 위한 중요조건으로 꼽았다.

시각적으로 관찰하기 어려운 현상을 시각화하는 전략은 과학 개념을 이해하는 데 효과적이라고 알려져 있다(안성국과 박일우, 2018). 시각적으로 표현하면 텍스트보다 더 많은 정보를 포함하며 직관적이기 때문에(Schnotz, 2002; Mayer *et al.*, 1996) 학생들이 새로운 개념을 더 쉽게 학습하도록 도울 수 있기 때문이다(Paivio, 1986; Lee, 2010; Roth *et al.*, 1999). 또한 시각화는 학생들의 동기유발과 주의 집중에 효과적이며(Cook, 2006) 이해한 내용을 공유하는 의사소통에도 중요한 역할을 한다(Kozma, 2003; Mathewson, 1999).

과학적 현상의 시각화는 학생 스스로 과학지식을 이해하는 과정에도 도움을 준다. 과학현상의 시각화는 주어진 정보 사이의 숨은 관계에 대한 통찰을 일으키게 되며(Eppler & Burkhard, 2004), 이와 같은 통찰은 가지고 있는 지식으로 문제를 해결할 수 없는 ‘막다른 골목’에 이르렀을 때 문제를 재구조화하여 모순을 해소하도록 도움을 주어 과학적 이해를 수월하게 할 수 있도록 한다는 것이다(Ohlsson, 1992; Weisberg, 2006; 이경민, 2016). 멀티미디어 학습이론에서는 시각화가 지식의 학습에 도움을 주는 과정에 대하여 학습자가 시각적 자료를 선택적으로 지각하고, 활성화된 사전 지식을 바탕으로 제시된 자료를 정신적으로 조직하여 기존의 인지구조에 통합한다는 ‘선택-조직화-통합과정’으로 설명한다(Mayer, 1999, 2003).

정신모형에 대한 세부적인 정의는 학자들마다 조금씩 다르지만 주어진 문제 상황을 설명하기 위해 개인이 인지구조를 바탕으로 내적으로 형성한 설명 체계라는 점에서 공통적이다(이선경, 2015; Gilbert,

2004; Rapp, 2005; Lee *et al.*, 2005). 학생들은 학습에 참여하기 이전부터 이미 형성된 나름의 지식이나 신념을 가지고 있으며 여기에는 비과학적인 지식이나 신념도 포함되어 있다고 알려져 있다(Driver *et al.*, 1985). 문성숙과 권재술(2008)은 학습자의 장기기억에 저장되어 있는 지식과 신념이 정신모형을 구성하는 근원이라고 보았으며 학습자가 해결해야 할 문제에 당면하면 선택적 활성화 과정을 거쳐 지식, 신념, 정보를 구조화시켜 정신모형을 표상하게 된다고 설명하였다.

학생들이 과학적 모형과 일치하는 정신모형을 구성하도록 하는 것은 과학교육의 중요한 목표의 하나이다(Justi & Gilbert, 2002; Chiou, 2013; 이선경, 2015). 따라서 학생들이 가지고 있는 비과학적인 지식이나 신념을 과학적인 것으로 변화시키도록 지원하여 과학적인 정신모형을 구성하도록 도울 필요성이 있다. 정신모형은 각자의 마음 속에 표상된 지식구조이므로 시각적 이미지가 매우 중요하다. 게다가 인간은 외부정보의 80%를 시각 정보로 얻기 때문에(Hoffman, 2000; Jacobson, 1999) 시각 정보는 정신모형 구성에 상당한 영향을 미치는 것으로 가정할 수 있다.

이 연구에서는 추상적 개념의 하나인 열전도 현상에 주목하였는데 ‘열’은 일반적으로 학생들이 이해하기 어려운 개념 중 하나이다. 특히, 초등학생과 같은 어린 학습자들에게 눈에 보이지 않는 열전도 현상을 과학적으로 이해하는 것은 쉽지 않은 일이다. 열과 관련하여 학생들이 가지고 있는 견고한 오개념 중의 하나가 ‘금속은 차가운 물질이다’와 같이 온도를 물질의 특성과 결합하여 보는 것이다(Driver *et al.*, 1985; Harrison *et al.*, 1999). 이와 같은 오개념은 학생들이 실제 금속을 만졌을 때의 경험과 결합하여 신념화되고 견고해지는 경향이 있다(Nisbett & Ross, 1980). 이와 같이 신념화된 오개념이 바로 ‘비과학적 신념’이다. 학생들은 일상생활에서 물체를 만져본 경험과 촉감 정보로부터 얻은 촉각 정보를 그 물체의 온도로 인식한다(Ezquerria & Ezquerria-Romano, 2018). 학생들이 과학적 모형과 일치하는 정교한 정신모형을 구성하기 위해서는 현상에 대한 이해의 폭을 넓힐 필요가 있는데(Eden *et al.*, 1992) 열화상 사진기를 활용한 시각화 자료는 추상적인 개념을 구체화하여 제시하게 되므로 학생들의 비과학적 신념을 변화시키는데 도움을 줄 수 있다.

학생들의 인지발달을 위해서는 내적인 요인뿐만

아니라 다른 사람이나 외부 환경과의 상호작용과정을 고려할 필요가 있다(Vygotsky, 1978). 여러 과학 학습 관련 연구에서는 과학 소집단 활동에서 이루어지는 상호작용에 주목하고 있는데, 소집단 활동 과정에서 학생들은 자신이 가진 정신모형을 외부로 표상하여 자신이 이해한 정도를 점검하는 기회를 얻을 수 있고(Gilbert *et al.*, 1998; Chittleborough *et al.*, 2005; Justi & van Driestl, 2005) 자신의 주장을 정당화하거나 상대방의 주장에 근거를 들어 비판하는 논변 과정을 통해 설득력 높은 모형을 구성할 수 있기 때문이다(Samson & Clark, 2009). 정신모형의 측면에서 소집단 활동에 참여한 구성원들은 각자의 정신모형을 바탕으로 참여하기 때문에(유희원 등, 2012; 양찬호 등, 2016; 박정우와 유준희, 2018) 소집단 활동에서 열화상 카메라를 활용한 자료와 같이 추상적 개념을 구체화한 시각 정보는 개인적인 인식 과정뿐만 아니라 사회적인 상호작용과정에도 영향을 미치고 이는 다시 개인의 정신모형 발달을 자극하게 된다. 즉, 소집단 내에서 열전도 현상을 시각화한 자료를 제시하고 구성원들과의 언어적 상호작용을 통해 관찰한 현상을 설명하게 하면 학생들의 열전도 관련 정신모형의 발달에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 기대할 수 있다.

학생들은 추상적인 과제보다 구체적인 과제를 할 때 더 수준 높은 언어적 상호작용을 주고받으며 과제에 자신 있게 참여한다고 알려져 있다(Von Aufschnaiter *et al.*, 2008). 열화상 사진기를 활용하면 비가시적이고 추상적인 열전도 현상을 시각화하여 볼 수 있으므로 소집단 활동에서의 언어적 상호작용을 촉진할 수 있을 것이다. 시각화된 자료가 소집단 활동에서 열전도 현상과 관련된 학생들의 정신모형의 변화과정에 어떤 영향을 미치는지 알아보는 것은 의미 있는 연구가 될 것이다.

그러므로 본 연구에서는 ‘금속이 차갑게 느껴지는 이유’를 설명하는 소집단 활동에서 열화상 사진기로 열전도 현상을 시각화한 자료가 초등학생들에게 미치는 교육적 효과에 관한 사례를 분석하고자 한다.

II. 연구 방법

1. 연구 참여자

본 연구는 서울특별시 소재 I 초등학교 5학년 2개 학급을 대상으로 진행되었으며 4명으로 구성된 1개 모둠의 학생들을 연구 참여자로 최종 선정하였다. 선정된 학생 4명의 정보는 Table 1과 같다. 학업성취도 평가는 ‘온도와 열’ 단원보다 먼저 수업을 진행했던 2개 단원(용해와 용액, 다양한 생물과 우리 생활)의 단원평가 성적의 평균 점수를 기준으로 평가한 결과를 참조하였다. 참여자 중 가온, 다희, 라울 학생 학업성취도 수준은 높았으며, 가온이는 지역교육청 과학영재 학급에 소속된 학생이다. 나준이는 학업성취도 수준이 보통인 학생이다.

연구 참여자는 다음의 두 가지 기준으로 선정하였다.

첫 번째 기준은 ‘온도와 열’ 단원 학습 기간에 수업 참여율이다. ‘금속이 차갑게 느껴지는 이유’를 설명하기 위해서는 열전도에 대해 학습한 여러 가지 과학적 지식을 적용할 필요가 있다. 그런데 연구가 이루어진 시기는 COVID-19로 인해 결석률이 높은 상황이었으며 열전도에 대한 지식을 학습하지 못한 학생들이 있는 모둠의 경우 소집단 활동이 원활히 이루어지지 못하였다. 이러한 이유로 열전도에 대한 과학적 지식을 교수·학습한 3~7차시 수업 및 본 연구가 이루어진 8~9차시 수업에 모두 참여한 학생들로 구성된 모둠 중에서 선정하였다.

두 번째 기준은 학생의 언어표현 능력이었다. 본

Table 1. Profiles of the participants

이름 (가명)	성별	학업 성취도	수업 중 관찰한 수업태도 및 언어 표현 능력	영재학급 소속여부
가온	남	높음	관찰한 현상을 과학적인 원리와 연결하여 설명하려는 모습을 자주 보임	지역교육청 과학영재
나준	남	보통	실험 활동에 매우 흥미를 보이며, 궁금한 것이 생겼을 때 주저하지 않고 질문하는 경향이 있음. 관찰한 내용을 구체적으로 설명함.	
다희	여	높음	수업 시간에 발표를 매우 열심히 하며 자신의 생각을 언어로 잘 표현함.	
라울	여	높음	자신의 생각을 정리하여 차분하고 설득력 있게 주장하며 수업 중 활동에 성실하게 참여함.	

Table 2. Topics and learning contents of ‘Temperature and heat’ unit

차시	주제	차시별 주요 학습 내용
3-4	온도계 사용법	· 여러 가지 온도계의 원리와 사용법. (알코올 온도계, 탐침 온도계, 열화상 사진기 등)
5	열의 이동 방향, 열평형	· 접촉한 두 물질 사이에서 열은 온도가 높은 물질에서 낮은 물질로 이동한다. · 두 물질이 접촉한 채로 시간이 지나면 두 물질의 온도는 같아진다.
6	전도	· 고체 물질을 가열하면 온도가 높아진 가열 부위에서 상대적으로 온도가 낮은 주변으로 열이 이동한다. · 고체에서 열은 고체 물질을 따라 이동한다.
7	열전도도	· 고체 물질의 종류에 따라 열이 이동하는 빠르기가 다르다(구리 > 철 > 유리).
8-9	소집단 활동	· 3~7차시에 학습한 과학적 지식을 바탕으로 ‘금속이 차갑게 느껴지는 이유’ 설명하는 소집단 활동 참여하기

연구는 학생들의 정신모형 변화를 살펴보는 것이다. 정신모형은 학생들이 소집단 내에서 구성원들과 의사소통하는 과정이나 반 구조화된 심층 면담에 참여하는 과정에서 언어로 표상되어 외부로 드러나는데 학생들의 언어표현 능력에 따라 연구자가 얻을 수 있는 정보의 양과 질에 차이가 있다. 이러한 이유로 언어표현 능력이 우수한 학생으로 구성된 모둠의 학생을 연구 참여자로 최종 선정하였다.

2. 수업 진행 과정

열화상 사진기로 제작한 시각화 자료의 관찰을 통해 ‘금속이 차갑게 느껴지는 이유’를 설명하기 위해서는 열화상 사진기 자료에 대한 이해와 열전도에 대한 과학적 지식이 필요하다. ‘온도와 열’ 단원의 차시별 주제 및 학습 내용은 Table 2와 같다. 연구자는 3~4차시에서 여러 가지 온도계의 원리와 사용법을 학습하는 시간에 열화상 사진기의 원리와 사용법에 대해 안내하였다. 5~7차시에는 각각 ‘열의 이동 방향’, ‘열평형’, ‘전도’, ‘열전도도’ 등 열전도에 관련된 과학적 지식을 소개하였다. 이 과정에서 열화상 사진기를 활용하여 제작한 시각화 자료를 제시하여 학생들이 열전도 현상을 시각적으로 관찰할 충분한 기회를 제공하였다.

8~9차시에는 5~7차시에서 학습한 여러 가지 과학적 내용을 적용하여 ‘금속이 차갑게 느껴지는 이유’를 설명하는 소집단 활동에 참여하도록 하였다. 금속토막과 나무토막의 뒷면에 2분간 손바닥을 올려놓았다가 떼는 실험을 열화상 사진기로 촬영하여 영상자료로 제공하였다(Fig. 1). 그리고 수업에서 학생들이 직접 체험할 수 있도록 실험에 사용된 금속토막과 나무토막을 제공하였다.

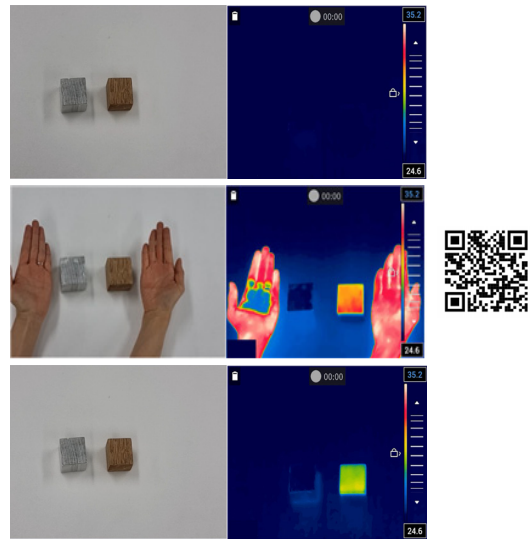


Fig. 1. Thermal imaging camera material presented to students

3. 자료 수집

본 연구는 열전도 현상을 시각화한 자료가 학생들의 정신모형에 미치는 영향을 심층적으로 알아보기 위한 질적 사례 연구이며, 한 가지 사례를 총체적이고 깊이 있게 이해하기 위해 다양한 질적 자료들을 수집하였다. 수집한 자료들에 대한 정보는 Table 3과 같다.

학생들이 가진 초기 정신모형을 살펴보기 위해 ‘온도와 열’ 단위 시작 전에 비대면 온라인 환경에서 사전심층 면담을 진행하면서 면담 내용을 기록하였다. 학생들의 정신모형이 변화하는 과정과 맥락을 살펴보기 위해 8~9차시의 소집단 활동 과정을 교실 앞에 설치한 카메라로 동영상 녹화하였으며 모둠별로 녹음기를 두어 녹음하였다. 또한 8~9차시에 학생들이 작성한 활동지와 연구자의 연구일지도 자료로 수집하였다. 학생들의 변화된 정신모형을 살펴보

Table 3. Data collected to analyze students' mental models

	수집한 자료	자료 수집 시기	비고
초기 정신모형	· 사전 심층면담 녹음/녹화	· 온도과 열·단원 시작 전	비대면(온라인)
정신모형 변화과정과 맥락	· 8~9차시 소집단 활동 녹음/녹화	· 8~9차시 수업 중	대면
	· 8~9차시 활동지		
	· 연구자의 연구일지		
변화된 정신모형	· 사후 심층면담 녹음/녹화	· 8~9차시 수업 2주 후	비대면(온라인)
	· 사후 심층면담 녹음/녹화	· 8~9차시 수업 2주 후	비대면(온라인)

기 위해 8~9차시 수업 후 2주 뒤에 온라인 비대면 환경에서 사후 심층 면담을 진행하면서 면담 내용을 기록하였다. 사전 사후 면담은 동일한 질문지를 이용하여 반 구조화된 면담으로 진행하였으며 질문지의 내용은 Table 4와 같다. 질문지의 내용은 정신모형을 생성하고 예상할 수 있도록 문제 상황을 제시하는 일련의 생성질문들(Chiou & Anderson, 2009; Vosniadou & Brewer, 1994)로 구성하였다. 학생들에게 질문에 대한 답을 언어뿐만 아니라 몸짓이나 그림 등 다양한 방식으로 표현하도록 요청하였으며 학생들의 정신모형을 분석하는 다양한 원천으로 활용하였다.

4. 자료 분석

본 연구에서는 수집한 여러 가지 질적 자료들을 반복적으로 비교 검토하는 지속적 반복적 연구 방법(Corbin & Strauss, 2014)을 사용하였다. 사전 사후 심층 면담 자료, 소집단 활동 녹화 녹음자료, 학생 활동지, 연구자의 연구일지 등 여러 가지 자료들을 통

해 소집단 활동에서 학생들의 정신모형이 변화해 가는 과정을 입체적으로 재구성하여 분석하고, 삼각 검증으로 연구의 신뢰도를 확보하고자 하였다.

1) 담화내용 명료화를 위한 비언어적 표현 분석

의사소통 과정에서 언어적 표현뿐만 비언어적 표현이 차지하는 비중이 크기 때문에(Mehrabian, 2009) 담화의 내용에 대한 이해도를 높이기 위해서는 표정이나 몸짓 등의 비언어적 표현을 함께 분석할 필요가 있다(나지연과 송진웅, 2012). 연구자는 음성녹음 전사 자료를 토대로 의미 있는 발화를 추출한 후 비디오 녹화자료와 비교하며 관련된 비언어적 표현을 기록하는 등의 방식을 통해 담화내용을 명료화하였다. Table 5와 같이 학생들은 담화 과정에서 금속토막이나 나무토막을 손가락으로 가리키며 ‘여기’, ‘저기’ 등의 표현을 사용하여 음성자료만으로는 정확한 의미를 파악하기 어려운 경우 비디오 녹화자료와 비교 분석하여 정확한 의미를 파악하였다. 또한 비디오 녹화자료로 얼굴 표정, 몸짓, 목소리의 톤 변화 등을

Table 4. Contents of the pre/post in-depth interview questionnaire

사전 · 사후 심층 면담 질문	주요 내용
1. 햇빛이 들지 않는 실내에 금속토막과 나무토막을 하루 동안 놓아두었을 때 두 토막의 온도를 비교하여 예상하고(실내온도와 비교하도록 추가 질문), 그렇게 생각한 이유 설명하기	· 상온과의 열평형 · ‘온도’는 물질의 성질이 아님
2. 금속토막과 나무토막의 뒷면을 2분간 손으로 만지고 난 후의 손, 금속토막, 나무토막의 온도 변화를 예상하고 그렇게 생각한 이유 설명하기	· 온도가 서로 다른 물질이 접촉했을 때의 열의 이동 · 물질의 종류에 따른 열의 전달 빠르기
3. 손을 떼고 충분한 시간이 지난 후의 손, 금속토막, 나무토막의 온도 예상하고 그렇게 생각한 이유 설명하기	· 물질의 종류에 따른 열의 전달 빠르기 · 상온과의 열평형
4. 금속이 차갑게 느껴지는 이유 설명하기	· 정신모형의 변화

<그림에 표시하며 설명하기>

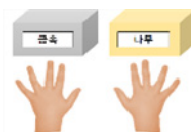
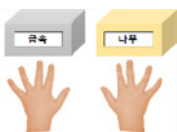


Table 5. Examples of clarification of discourse content through non-verbal expression analysis

음성 전사자료	비디오 녹화자료와 비교 후 보충하여 정리한 전사 자료
“왜 그러는 거지? 이 색깔이 왜 여기에 가 있냐고, “왜 그러는 거지? 이(금속토막의) 색깔이 왜 여기(금속을 만진 손바닥)에 가 있 왜 여긴 안 나오고 여기만!”	냐고, 왜 여긴(나무를 만진 손바닥) 안 나오고 여기(금속을 만진 손바닥에)만!”

종합적으로 비교 분석(Jordan & Henderson, 1995)하여 학생들의 동기 수준이나 참여 수준에 대한 정보를 얻었다.

2) 소집단 담화 분석

열화상 사진기로 열전도 현상을 시각화한 자료가 학생들의 정신모형 변화에 미치는 영향을 분석하기 위해서 소집단 담화의 유형과 양상을 분석하였다. 담화 분석을 위해서 Table 6과 같이 Toulmin(2006)이 제시한 논증 요소를 변형하여 사용하였다. 학생들이 관찰한 현상에 대해 제기하는 질문들을 질문(I, Inquiry)으로 새롭게 유형화하였으며 관찰한 현상에 대한 학생들의 해석을 주장(C, Claim)으로 분류하였다. 해석이나 주장하는 내용을 정당화하는 진술은 보장(W)으로 분류하였으며, 상대방의 해석(C)이나 보장(W), 자료(D) 등에 대해 반박하는 내용의 진술은 반박(R)으로 분류하였다. Toulmin은 주장에 대한 근거는 자료(D)로, 주장을 정당화하기 위한 보장(W)에 대한 근거는 보강(B)으로 이원화였으나 본 연구에서는 관찰한 현상에 대한 해석이나 이를 정당화하기 위한 진술에 대한 근거를 모두 자료(D)로 단순화하였다. 자료(D)의 유형은 열화상 사진기를 활용한 시각화 자료(D1)와 교과서 내용, 개인적 견해, 생활 속 예시 등의 그 밖의 자료(D2)로 분류하여 시각화 자료(D1)의 영향을 집중적으로 분석하였다.

소집단 담화 분석을 위해 다음과 같은 절차를 거쳤다. 첫 번째 단계에서는 소집단 활동을 녹화 및 녹음한 자료를 비교하여 전사하고 반복적으로 확인하며 의미 있는 대화 내용을 추출하였다. 두 번째 단계

에서는 Table 6의 소집단 담화 유형 분석 틀을 기초로 학생들의 담화 유형을 분류하였다. 세 번째 단계에서는 학생들이 질문(I)이나 해석(C)을 제기하거나, 보장(W)이나 반박(R) 등을 주고받는 과정에서 열화상 사진기를 활용한 시각화 자료(D1)가 의미 있게 관여하는 부분을 집중적으로 검토하여 비슷한 내용을 범주화하였다. 네 번째 단계에서는 동일 범주로 분류된 내용 간의 의미론적 관계를 탐색하였으며 여러 가지 범주 간의 의미론적 관계를 탐색하고 검토하였다.

연구자의 자의적 해석을 최소화하고자 사후 면담에서 연구 참여자와 함께 수업 당시의 발화내용 및 근거 등을 함께 검토하는 과정을 거쳤다. 또한 사전·사후 면담 자료, 수업 녹화녹음자료, 연구자의 연구 일지 등 수집한 자료를 반복적으로 검토하여 삼각 검증하였다.

3) 정신모형 분석

‘금속을 만지면 차갑게 느껴지는 이유’에 대한 학생들의 정신모형을 분석하기 위해 다음과 같이 다섯 단계의 분석 절차를 거쳤다.

첫 번째 단계에서는 분석기준을 정하기 위해 Table 7과 같이 목표 모형인 과학적 모형을 설정하였다. 설정한 과학적 모형은 ‘어느 정도 크기 이상이면서 같은 크기와 모양의 금속토막과 나무토막을 손바닥에 접촉한 경우, 손바닥에서 나무보다 열전도도가 더 큰 금속 쪽으로 열이 더 많이 이동하기 때문에 금속 토막에 접촉한 손바닥이 더 차갑게 느껴진다’이다.

두 번째 단계에서는 목표로 설정한 과학적 모형을

Table 6. Frame of small group discourse type analysis

담화 유형	설명
질문(I)	관찰한 현상에 대한 의문점 제기
해석(C)	관찰한 현상을 설명하기 위한 진술
보장(W)	해석이나 주장하는 내용을 정당화하기 위해 제시하는 진술(규칙, 이론, 법칙 등)
반박(R)	상대방의 해석(C)이나 보장(W), 자료(D) 등에 대한 반박
자료(D)	D1 열화상 사진기 자료
	D2 그 밖의 자료 (교과서 내용, 생활 속 예시, 개인적 견해 등)

해석(C)이나 보장(W)을 뒷받침하기 위한 근거

Table 7. A scientific model for ‘the reason why metals feel cold’

과학적 모형(목표 모형)
<ul style="list-style-type: none"> 어느 정도 크기 이상이면서 같은 크기와 모양의 금속토막과 나무토막을 손바닥에 접촉한 경우, 손바닥에서 나무보다 열전도도가 더 큰 금속 쪽으로 열이 더 많이 이동하여 금속토막에 접촉한 손바닥이 더 차갑게 느껴진다. 실내온도와 거의 열평형 상태인 금속토막 온도보다 손바닥의 온도가 높으므로 손바닥으로 금속토막을 접촉하면 손바닥에서 금속토막으로 열이 이동한다. 이때 열전도도가 큰 금속토막에서 접촉면을 통해 금속 전체로 열이 빠르게 이동해서 접촉면의 온도 상승 폭이 작다. 온도가 서로 다른 두 물체가 접촉하면 열평형이 될 때까지 열이 이동하므로 손바닥에서 금속토막으로 많은 양의 열이 계속 빠져나가서 차갑게 느껴진다. 그러나 손바닥으로 나무토막을 접촉하면 나무토막의 열전도도가 금속보다 작아서 나무토막 접촉면 부위만 손바닥과 같은 온도로 거의 열평형 상태에 빠르게 도달하고, 나무토막의 열전도도는 작아서 나무토막 내부로는 열이 거의 전달되지 않는다. 그래서 손바닥으로 나무토막을 접촉하면 금속토막의 경우보다 적은 양의 열이 이동하기 때문에 나무토막은 금속토막보다 덜 차갑게 느껴진다.

구성하기 위한 과학적 지식을 추출하였으며 이를 기반으로 정신모형 분석기준을 설정하였다(Table 8). ‘금속이 차갑게 느껴지는 이유’에 대한 과학적 모형을 구성하기 위해서는 전도, 열평형, 열전도도, 손바닥의 열 손실과 촉감과의 관계 등에 관한 지식이 필요하다. 이를 바탕으로 설정한 분석기준의 내용은 ‘접촉한 두 물체 사이의 온도 차이를 고려하여 설명하는가?’, ‘접촉한 물체 간의 열평형을 고려하여 설명하는가?’, ‘물질의 열전도도 차이를 고려하여 설명하는가?’, ‘촉감의 차이를 열의 이동으로 설명하는가?’ 등이다.

세 번째 단계에서는 설정한 분석기준을 토대로 연구 참여자 4명의 정신모형을 개별수준에서 분석하여 정리하였다. 학생들이 4가지 분석기준에 해당하는

지식이나 신념을 적용하여 ‘금속이 차갑게 느껴지는 이유’를 설명하는지 면담 시기별(사전/사후)로 분류하여 정리하였다.

네 번째 단계에서는 정리한 자료를 바탕으로 비슷한 속성의 설명끼리 범주화하였으며 각 범주의 속성을 반영한 명칭을 부여하여 정신모형을 유형화하였다. 예를 들어 ‘금속이 차갑기 때문에 차갑게 느껴진다’는 등의 설명은 접촉한 물체 간의 열의 이동이나 열평형, 열전도도 등에 대해 고려하지 않는 유형의 설명으로 이러한 정신모형을 ‘촉감 온도계 모형’으로 분류하였다.

마지막 단계에서는 연구 참여자 4명의 사전 심층 면담으로 분석한 초기 정신모형과 사후 심층 면담으로 분석한 변화된 정신모형을 정신모형 유형을 기준으로 분류하여 표로 정리하였다.

본 연구에서는 소집단 활동 과정에서 수집한 자료와 사전 사후 면담으로 수집한 자료들을 비교·분석함으로써 열화상 사진기를 활용하여 제작한 시각화 자료가 학생들의 정신모형 변화에 미치는 영향을 자세하게 분석하고자 하였다.

III. 연구 결과 및 논의

1. 열화상 사진기로 열전도 현상을 시각화한 자료의 효과

1) 신기함과 호기심 유발

학생들은 열화상 사진기로 제작한 시각화 자료를 관찰하며 매우 흥미 있어 하였고 신기함과 놀라움의

Table 8. Knowledge for constructing a scientific model for ‘why metal feels cold’ and analysis criteria for analyzing students’ mental models

과학적 모형을 구성하기 위한 지식	· 전도 : 고체에서의 열의 이동 방향
	- 온도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 열이 이동한다.
과학적 모형을 구성하기 위한 지식	· 열평형 : 접촉한 물체 간의 열평형
	- 온도가 서로 다른 두 물체가 접촉하고 충분한 시간이 지나면 두 물체의 온도가 같아진다.
과학적 모형을 구성하기 위한 지식	· 열전도도 : 물질에 따른 열의 이동 빠르기
	- 물질마다 열이 이동하는 빠르기가 다르다.
과학적 모형을 구성하기 위한 지식	· 손바닥의 열 손실과 촉감의 관계
	- 단위 시간당 손바닥에서 열이 많이 빠져나갈수록 차갑게 느낀다.
정신모형 분석기준	· 접촉한 두 물체 사이의 온도 차이를 고려하여 설명하는가?
	· 접촉한 물체 간의 열평형을 고려하여 설명하는가?
	· 물질의 열전도도 차이를 고려하여 설명하는가?
	· 촉감의 차이를 열의 이동으로 설명하는가?

감정을 드러냈다. 특히 학생들이 가장 강렬한 감정적 반응을 보이며 놀라움을 나타냈던 순간은 금속토막과 나무토막에 접촉했던 손을 뺀 직후의 손, 금속토막, 나무토막의 색깔 변화를 관찰했을 때였다. 소집단 활동을 녹화한 동영상 분석한 결과 Table 9와 같이 금속토막과 나무토막에서 손을 떼는 순간 학생들은 모두 탄성을 지르면서 영상에 집중하였다.

학생들은 8~9차시 소집단 활동 과정에서 열화상 사진기 자료를 처음 보았을 때 표정, 몸짓, 감탄사 등의 다양한 방식으로 신기함과 놀라움을 나타냈으며, 사후 심층 면담에서도 열화상 사진기 자료로 관찰한 열전달 현상을 ‘신기하다’라고 표현하였다.

(사후 면담 내용 일부)

나준 : 진짜 신기했어요. 손으로 금속이랑 나무랑 만지고 나서 온도가 변하는 게 눈에 보이니까 너무 신기했어요. 손에 네모 모양 찍히는 게 제일 신기했어요.

리율 : 신기하기도 했고, 약간 이해가 안 되는 부분이 많았는데 그래서 더 재미있었던 것 같아요. 왜 그런지 계속 생각해보고 애들이랑 얘기해보고 그러는 게 재미있었어요.

‘신기함’이라는 감정은 새로운 정보를 수용할 때

Table 9. Part of conversation while watching a thermal imaging camera

대화 시 보고 있는 열화상 사진기 영상	학생 대화 내용
	다희 : 오, 선생님 손 너무 뜨거워~ 나준 : 오오 엄청 뜨거워 가은 : 언제까지 대고 있는 거..
	(영상에서 손을 금속과 나무토막에 2분간 대고 있다가 뺀)
	모듬원 모두 : 오오오! 대박! (손에 네모 자국이 생기는 것을 보고 모두 놀라워함)
	가은 : 야, 근데 금속은 왜 이래? 다희 : 파란 색깔(그대로네?)~ (중략)
	나준 : 애들이, 나무가 철보다 열이 더 잘 전달되는 거 아니야? 다희 : 이거(노란색으로 변환토막) 철이야?

놀라움과 쾌감이 혼합되어 나타나는 긍정적인 인식적 감정으로(이가람 등, 2020; 허민아 등, 2019), 새로운 정보에 대한 호기심을 불러일으키고 탐색적인 행동으로 이어진다고 알려져 있다. 학생들은 열화상 사진기 자료에서 관찰한 현상에 대해 ‘왜?’라는 인과적 질문을 쏟아내며 소집단 활동에 적극적으로 참여하는 모습을 보였다. 또한 8차시 수업 시간이 얼마 남지 않자 추가시간을 요청하거나 수업 시간 이후에도 과학실에 남아 활동지를 작성하며 몰입하는 모습을 보이기도 했다. 이처럼 열화상 사진기를 활용하여 열전도 현상을 시각화한 자료는 학생들이 소집단 활동에 적극적으로 참여하여 활발히 상호작용하도록 촉진하였다.

2) 여러 물체의 온도 변화를 고려한 통합적 사고의 기회 제공

알코올 온도계나 탐침 온도계와는 달리 열화상 사진기를 활용한 시각화 자료는 실험맥락에 따라 여러 물체의 온도 변화를 한꺼번에 볼 수 있어서 열전도 현상에 대한 통합적 사고의 기회를 제공한다.

학생들은 열화상 사진기로 열전도 현상을 시각화한 자료를 보며 소집단 활동을 하는 과정에서 질문을 제기하였다. 질문의 범주는 크게 6가지이며 질문이 제기된 순서대로 번호를 붙여 Fig 2에 정리하였다.

질문 1은 ‘왜 금속을 만진 손바닥에 파란색 네모 자국이 생겼는가?’이다. 학생들이 열화상 사진기 자료를 보며 가장 신기해했던 장면과 관련된 것으로 가장 먼저 제기된 질문이었다. 질문 2는 ‘왜 손으로 만진 뒤에도 금속의 온도 변화가 없는가?’이다. 손바닥에 생긴 파란색 네모 자국과 비교하며 손과 접촉한 이후 금속토막 윗면의 색깔 변화가 없는 이유를 물었다. 질문 3은 ‘왜 나무의 온도가 많이 올라갔는가?’

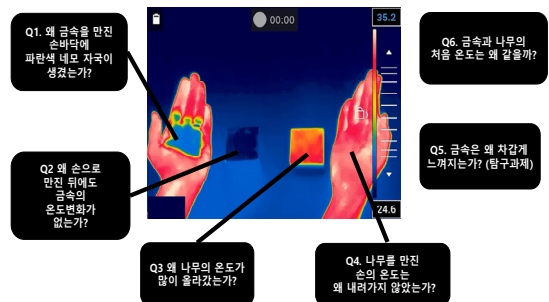


Fig. 2. Several questions posed by students

가?’이다. 손과 접촉한 이후 나무토막의 윗면의 색은 빨간색으로 바뀌었는데 금속토막의 윗면의 색은 바뀌지 않은 이유를 물었다. 질문 4는 ‘나무를 만진 손바닥 온도는 왜 올라가지 않았는가?’이다. 금속을 접촉한 손바닥 부분은 파랗게 변하는데 나무를 만진 손바닥 온도는 변하지 않은 것에 대해 의문을 제기한 것이다. 질문 5는 ‘금속은 왜 차갑게 느껴지는가?’이다. 이것은 연구자가 제시한 소집단 활동의 주제와 일치하는 것으로서 소집단 활동 과정에서 학생들이 계속 제기한 질문이다. 질문 6은 ‘금속과 나무의 처음 온도는 왜 같을까?’이다. 열화상 사진기 자료를 관찰하면 손바닥으로 만지기 전의 금속토막과 나무토막의 색이 주변과 같이 모두 파란색으로 나타나는 것을 관찰할 수 있다. 그러나 이것은 시각적으로 두드러지는 장면이 아니기 때문에 학생들이 처음으로 관찰할 당시에는 주목하지 못했다. 소집단 활동이 진행되는 과정에서 ‘금속과 나무의 처음 온도가 같았다’는 반박이 제기되면서 이에 대한 근거를 확인하는 과정에서 질문 6이 제기되었다.

질문 6개는 서로 다른 물체들의 온도 변화에 관한 질문들이다. 열화상 사진기를 통해 여러 가지 물체들의 온도 변화를 한눈에 볼 수 있었던 학생들은 서로 다른 물체들의 온도 변화를 연결하여 사고하거나 그들 간의 상관관계에 대해 탐색하는 모습을 보였다. Table 10은 학생들이 서로 다른 물체들의 온도 변화를 연결하여 상황을 전체적으로 이해하고자 하는 모습이 잘 드러난 대화의 일부이다.

가온이는 손바닥으로 나무를 접촉한 뒤 나무의 온도가 올라간 것(질문 3)과 손바닥의 온도 변화가 없

는 것(질문 4)에 대한 의문을 연결하여 제기하였다(발화 1, 3). 한 번에 하나의 온도정보만 얻을 수 있는 알코올 온도계와는 달리 열화상 사진기는 여러 가지 물체의 온도정보를 동시에 얻을 수 있기 때문에 손바닥과 나무토막의 온도 변화를 연결하여 통합적으로 사고할 수 있었던 것이다.

라울이는 손과 접촉했던 나무토막 윗면의 온도가 올라간 현상에 대해 ‘손에 있던 열이 나무토막으로 이동하였다’는 해석을 제시하였다(발화 5). 이에 대해 나준이와 다희는 ‘그럼 철은 왜 안 그런데?’, ‘철은 열이 전달이 잘 안 되는 건가?’라며 금속토막의 온도 변화를 근거로 반박을 제기하였다. 이처럼 학생들은 금속토막, 나무토막, 금속토막을 만진 손, 나무토막을 만진 손 등 여러 가지 물체의 온도를 연결하여 통합적으로 사고하는 모습을 보였다. 열화상 사진기 자료를 통해 맥락정보와 결합된 여러 가지 물체들의 온도 변화정보를 획득한 것이 관찰한 현상에 대한 통합적인 사고의 기회를 제공한 것으로 볼 수 있다.

3) 해석과 반박을 위한 시각적 근거자료 제공

열화상 사진기를 활용하여 열전도 현상을 시각화한 자료는 학생들이 해석과 반박을 제기하기 위한 시각적 근거자료의 역할을 함으로써 언어적 상호작용을 활성화하는 역할을 하였다. Fig 3은 ‘왜 금속을 만진 손바닥에 파란색 네모 자국이 생겼는가?’라는 질문 1에 대해 학생들이 나름의 해석과 반박을 주고 받은 내용 일부를 도식화한 것이다.

다희, 가온, 나준이는 질문 1(왜 금속을 만진 손바닥에 파란색 네모 자국이 생겼는가?)에 대해 각각 해

Table 10. Part of conversation in the process of observing the temperature change of a piece of metal after touching it

발화 번호	연구 참여자	의사소통 내용	답화 유형
1	가온	근데 왜 여기서 나무가, (나무를 만진)손은 온도변화가 없고 나무만 온도 변화가 있었던 이유!?	질문 3, 질문 4 제시(I-D1)
2	나준	어, 저, 봐봐, 손은 이쪽(금속을 만진) 손바닥의 온도가 변하고, 나무는, 나무의 온도가 변해. 왜 그런 걸까?	질문 3, 질문 4 제시(I-D1)
3	가온	우리가 생각하는 일단, 나무를 생각해보자. 나무를 만진 손은 손의 온도는 변화가 없는데 나무의 온도는 변화가 있어. 왜 그런 거야? 왜 그런 걸까?	질문 3, 질문 4 제시(I-D1)
4	나준	그건 몰라.	
5	라울	왜냐하면 나무는 이 주변 온도와 똑같았는데 주변 온도보다 뜨거운 손이 애를 만졌으니까 손에 있던 열이 애한테 전달된 거지.	해석 3-1(C-W-D1)
6	나준	그럼 철은 왜 안 그런데?	해석 3-1에 대한 반박(R-D1) 및 질문 2 제시 (I-D1)
7	다희	(철은) 열이 전달이 잘 안 되는 건가?	해석 2-1(C-W-D2)

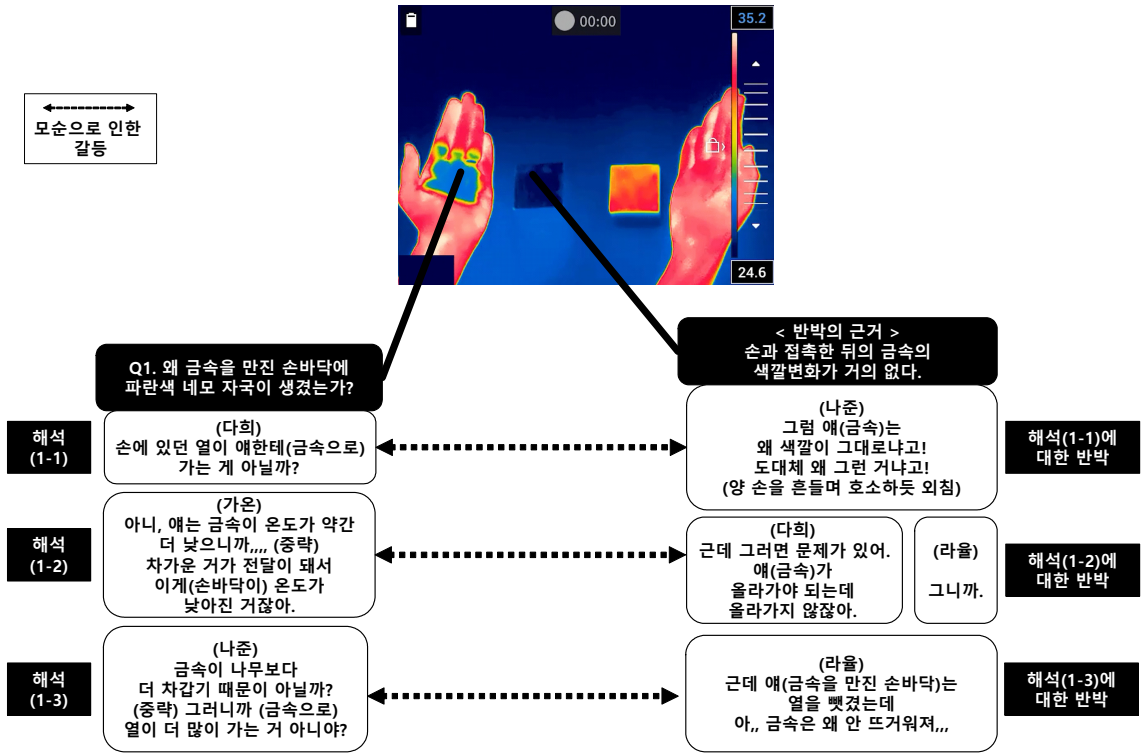


Fig. 3. Interpretation and refutation based on observed phenomena

석 1-1, 1-2, 1-3을 제기하였는데 세 가지 해석은 모두 ‘손과 접촉한 뒤의 금속의 색깔 변화가 없다’는 같은 시각적 근거를 바탕으로 한 반박에 직면하였다.

다희가 제기한 ‘손에 있던 열이 금속으로 간다’는 해석 1-1에 ‘열을 전달받은 금속의 색깔이 왜 변화가 없냐?’고 나준이가 반박하였다. 또한 가온이가 제기한 ‘금속의 차가움이 손으로 전달되어서 손바닥의 온도가 낮아졌다’는 해석 1-2에 ‘차가움이 빠져나간 금속의 온도가 올라가지 않았다’고 다희가 반박하였다. 나준이는 ‘금속이 나무보다 더 차갑기 때문에 손에서 금속으로 더 많이 가서 손바닥에 파란색 네모 자국이 생겼을 것이다’라는 해석 1-3에 라울이가 ‘금속의 온도 변화가 거의 없다’는 관찰 결과를 근거로 반박하였다. 반박에 직면한 학생들은 자신의 해석에 관한 주장을 보류하거나 주장을 뒷받침할 수 있는 다른 근거를 탐색하였다. 이처럼 열화상 사진기에서 획득한 시각 정보를 바탕으로 학생들은 한 개의 질문(질문 1)에 대해서도 다양한 해석과 반박들을 주고받으며 활발하게 의사소통하는 모습을 보였다.

눈에 보이지 않던 열전도 현상을 시각화한 자료는 학생들이 관찰한 현상을 해석하고 다른 학생의 해석

을 평가하고 반박하는 데 활용되었다. 시각화 자료는 모두 구성원 간의 언어적 상호작용을 촉진하고, 반박에 직면한 학생들이 자신의 해석을 비판적으로 검토하는 근거자료로 매우 유용하였다.

4) 비과학적 신념과 관찰한 현상 간의 불일치 인식

비가시적인 현상인 열전도 현상을 시각화한 자료는 학생들이 비과학적 신념을 비판적으로 검토하는 계기를 제공하였다. 나준이는 소집단 활동 과정에서 ‘금속은 온도가 낮은 물질이다’라는 비과학적 신념을 지속적으로 드러낸 학생이다. Table 11은 나준이의 비과학적 신념이 잘 드러난 대화의 일부이다.

‘금속은 왜 차갑게 느껴질까?’라는 질문에 대해 나준이는 ‘금속이 우리 체온보다 낮으니까(발화 8)’라는 해석을 제시하였다. 이에 다희가 ‘나무도 우리 체온보다 낮아(발화 9)’라는 반박하였음에도 불구하고, 나준이는 또다시 ‘금속이 우리 체온보다 낮아. 나무는 비슷비슷하고(발화 10)’라고 하며 ‘금속은 온도가 낮은 물질이다’는 비과학적 신념을 드러냈다.

이에 대해 라울이는 ‘애초에 애네(금속토막과 나무토막) 온도가 같지 않았어?(발화 13)’라며 시각화 자

Table 11. Part of a conversation in which Na-Jun expressed his unscientific belief that ‘metal is a material with a low temperature’

발화 번호	연구 참여자	의사소통 내용	담화 유형
8	나준	금속은 왜 나무보다 차갑게 느껴질까,,, 금속은 우리 체온보다 낮으니까!	해석 5-1(C-W-D2)
9	다희	나무도 우리 체온보다 낮아!	해석 5-1에 대한 반박 (R-W-D2)
(중략)			
10	나준	우리가 지금까지 얻은 정보를 합해보면 금속이 우리 체온보다 낮아. 나무는 비슷비슷하고.	해석 5-1(C-W-D2)
11	다희	나무가 뭐랑? 체온이랑 비슷하다고?	
12	나준	그러니까(금속으로) 열이 더 많이 가는 거 아니야? 그래서 금속을 만진 손도 더 파랗게 되는 거잖아.	해석 1-3(C-W-D1)
13	라울	아니 근데 애초에 애네(금속토막과 나무토막)가 온도가 같지 않았어?. 금속이 차가운게 아니고?	해석 1-3에 대한 반박(R-D1)
14	나준	(두 토막의 처음 온도가) 같다고?	라울이의 반박에 대한 재반박 및 의문제기(R-I-D1)

료를 근거로 반박하였다. 모둠 구성원들의 지속적인 반박에 직면한 나준이는 자신의 비과학적 신념과 모둠원들이 제기한 반박 내용 간의 불일치를 인식하는 모습을 나타냈다(발화 14).

금속토막과 나무토막의 온도에 대한 상반된 주장이 이어지는 갈등 상황에서 학생들은 Table 12와 같이 시각화 자료를 반복적으로 관찰하며 모순을 해소하고자 하였다.

학생들은 시각화 자료를 처음부터 다시 살펴보며 손, 금속토막, 나무토막의 온도를 확인하였다. 가온이는 시각화 자료의 금속토막과 나무토막을 가리키며 처음 온도가 같았음을 반복적으로 설명하였다(발화 16, 23). 나준이는 금속토막과 나무토막을 실험 영상의 장면처럼 만졌다가 떼기도 하고 손에 쥐었다가 놓기도 하며 모둠 친구들과 같이 열화상 사진기 자료를 확인하였다. 촉감 정보와 시각 정보의 불일치로 인한 모순을 인식하고 고민하던 나준이는 마침내 가온이의 ‘금속과 나무의 처음 온도는 같았다’는 설명을 수용하였다. 이것은 나준이가 금속토막과 나무토막을 만져서 얻은 촉감 정보보다 열화상 사진기를 통해 얻은 ‘금속토막과 나무토막의 처음 온도가 같다’는 시각 정보를 더 신뢰하게 되었음을 의미한다.

비과학적 신념을 변화시키기 위해서는 비과학적 신념이 옳지 않은 이유와 함께 관련된 현상을 시각화하여 제시하는 것이 효과적이라고 알려져 있다 (Hynd & Guzzetti, 1998; Rapp, 2005). 나준이는 열화상 사진기의 시각 자료와 자신의 비과학적 신념 간의 불일치를 인식하고, 소집단 내의 상호작용에서

Table 12. Part of conversation confirming initial temperature of metal and wood

발화 번호	연구 참여자	의사소통 내용
15	라울	처음부터 봐봐.
16	가온	됐다. 자, 처음에 온도가 똑같애.
17	나준	비슷해
18	다희	거의 비슷해
19	가온	근데 만졌어.
20	다희	금속에서 손이. 손이 금속에 닿은 부분만 차가워져.
21	가온	응. 그거까지는 알겠어.
22	나준	그리고 손이 닿은 나무는 나무만 차가워져. 잠깐만. 차분히 정리해보자. 금속이랑 나무의 온도는 처음에 비슷했어. 근데 손을 땀어. 그리고 나무에도 손을 땀어.
23	가온	나준아 봐봐, 차분히 정리를 하면은. 애네 둘의 온도는 비슷했어.
(나준이는 가온이가 설명하는 동안 금속토막과 나무토막을 만지며 생각에 빠져있음.)		
24	나준	(설명을 들은 후에 고개를 끄덕임) 어.

‘금속은 온도가 낮은 물질이다’는 비과학적 신념을 수정한 것으로 볼 수 있다.

5) 관찰과 발견을 통한 사고의 도약과 지식의 확장

열화상 사진기 자료를 관찰하며 실험하기 전의 여러 가지 물체들의 온도가 주변의 온도와 같다는 것을 발견한 학생들은 Table 13과 같이 ‘상온과의 열평형’이라는 학습하지 않은 과학적 지식을 도출하고

공유하는 모습을 보여주었다.

금속토막과 나무토막, 그리고 주변의 온도가 왜 같은지에 대한 질문(질문 6)에 가온이는 ‘일단 왔으니까 그 주변 온도가(발화 26)’, ‘모든 온도는 시간이 지나면(발화 31)’ 등으로 설명하려고 하였으나 다른 학생이 동시다발적으로 저마다의 해석을 시도하여 설명을 끝까지 이어가지 못했다. 사후 면담에서 해당 장면을 보여주며 추가 설명을 요청한 결과 가온이는 ‘같은 장소에 있는 물체들은 시간이 지나면 온도가 같아진다’는 해석 6-1을 제시하였음을 알 수 있었다.

나준이는 금속토막과 나무토막의 온도가 같은 이유에 대해 ‘온도가 더 높은 물체가 닿지 않았기 때문에(발화 27)’, ‘우리가 지금 안 만졌으니까 비슷비슷하겠지(발화 33)’라는 해석을 제시하였다. 즉, 온도가 더 높은 물체에 접촉하기 전까지는 물체의 온도가 비슷하다고 생각하였다.

라울이는 ‘그래, 그, 닿지 않기 전에 왜 같아? 왜냐면 서로 열을 공유해서 다 똑같이 만드니까 높은 데서 낮은 데로 열이 흘러서, 맞지?(발화28)’와 같이 나준이가 과학적 사고를 하도록 설득하였다. 이 과정에서 라울이는 온도가 서로 다른 두 물체가 접촉하

면 열평형을 이룬다는 학습한 지식을 물체와 주변공기의 관계에 적용하여 설명하는 모습을 보였다. 이것은 라울이가 열화상 사진기로 물체와 주변 공기의 온도를 함께 살펴봄으로써 물체와 닿아있으며 열을 전달하는 매개체인 ‘주변공기’를 인식하였기 때문인 것으로 보인다.

같은 것을 보더라도 사람마다 해석이 다를 수 있는데(Arnheim, 1974), 다희와 나준이는 물체와 접촉하여 열을 전달할 수 있는 매개체인 주변공기의 존재에 대해 인식하고 있지 않았다. ‘높은데서 낮은데로 열이 흘러서(발화 28)’라는 라울이의 해석에 대해서 다희와 나준이는 ‘닿아있지 않잖아(발화 29, 30)’라며 반박하였다. 이것은 물체와 닿아있는 ‘공기’의 존재를 인식하지 못하고 있음을 보여준다. 그러나 이후 ‘주변온도랑 닿아있으니까’라며 학습한 지식을 ‘물체’와 ‘주변공기’에 적용한 라울이의 설명(발화 36)을 듣고 열화상 사진기 자료를 확인하던 다희와 나준이는 라울이의 해석에 동의하는 모습을 보여주었다(발화 37, 38).

학생들은 열화상 사진기 자료를 통해 실내에 오랫동안 놓아둔 물체의 온도가 주변 온도와 같음을 시각적으로 확인하였고 열을 전달할 수 있는 매개체로

Table 13. Part of a conversation about thermal equilibrium between objects in a room and the ambient temperature

발화 번호	연구 참여자	의사소통 내용	답화 유형
25	라울	그럼 생각해봐. 주변의 온도와 나무, 금속의 온도가 왜 같아?	질문 6 제시(I-D1)
26	가온	일단 왔으니까 그 주변 온도가	해석 6-1(C-W)
27	나준	(가온이와 동시에 대답) 그니까 다른,, 온도가 더 높은 물체가 닿지 않았기 때문에	해석 6-2(C-W-D1)
28	라울	그래 그, 닿지 않기 전에 왜 같아? 왜냐면 서로 열을 공유해서 다 똑같이 만드니까 높은 데서 낮은 데로 열이 흘러서, 맞지?	해석 6-3(C-W-D2)
29	다희	근데 닿아있지 않잖아.	해석 6-3에 대한 반박(R-D1)
30	나준	그러니까 닿아있지 않으니까 (동시에 가온이가 말 시작함)	해석 6-2 보충(W-D1)
31	가온	모든 온도는 시간이 지나면~ (라울 말 시작함 / 가온이는 귀를 막고 생각에 잠김)	해석 6-1 보충(C-W)
32	라울	주변이랑 닿아 있잖아.	해석 6-3 보충(C-D1)
33	나준	우리가 지금 안 만졌으니까 비슷비슷하겠지.	해석 6-2 보충(C-W-D2)
34	라울	음. 어쨌든 어쨌든. 열은(다희 말 시작함)	
35	다희	만지기 전에는 실내온도랑 같아	시각자료 관찰 및 공유(D1)
36	라울	근데 지금 실내온도랑 똑같은 이유가 뭐냐고. 왜냐하면 열이 높은 곳에서 낮은 곳으로 이동하니까 주변 온도랑 닿아있으니까 실내 물건들이 다 같아진 거지(열화상 사진기 화면 위에서 손을 움직이며)	해석 6-3 정교화(C-W-D1,D2)
37	다희	(가만히 생각하더니) 맞아.	해석 6-3 수용
38	나준	(고개를 끄덕끄덕하며 수용의 표현함)	해석 6-3 수용

서의 공기의 존재를 새롭게 인식하고 공유하였다. 이처럼 열화상 사진기로 열전도 현상을 시각화한 자료는 학생들이 ‘주변공기’의 존재를 스스로 인식하도록 도와주었고, ‘상온과의 열평형’이라는 학습하지 않은 지식까지 지식의 범위를 확장하게 되었다.

6) 정교한 관찰과 발견을 통한 모순 해소

손바닥을 2분간 금속토막 위에 올려놓았다가 떼면 금속토막 전체의 온도가 약간 상승하며 금속토막의 형체가 희미하게 드러난다. 그러나 학생들은 처음에는 금속토막의 온도가 미세하게 올라간 것을 발견하지 못하였다. 학생들은 손과 접촉한 이후에도 금속의 온도 변화를 발견하지 못하고 ‘나무가 금속보다 열을 더 잘 전달한다’는 대안적 개념을 생성하기도 하였다. Table 14는 학생들이 ‘금속은 나무보다 열을 잘 전달한다’는 학습한 지식과 ‘나무는 금속보다 열을 잘 전달한다’는 대안 개념 사이에서 혼란스러워하는 모습이 나타난 대화의 일부이다.

손과 접촉한 후의 금속토막의 온도 변화를 발견하지 못한 학생들은 ‘금속은 열이 잘 전달되지 않는다(해석 2-1/ 발화 40)’, ‘금속보다 나무가 열을 더 잘 전달한다(해석 2-2/발화 45, 47, 49, 52)’는 대안 해석으

로 관찰한 현상을 설명하고자 시도하였다. 그러나 학생들이 제기한 해석들(해석 2-1, 해석 2-2)은 ‘금속이 나무보다 열을 더 잘 전달한다’는 학습한 지식을 바탕으로 한 반박에 부딪히게 되었다.

학생들은 반박에 부딪혀 학습한 과학적 지식을 상기하였음에도 불구하고 대안적 해석을 쉽게 포기하지 못하고 혼란스러워 하는 모습을 보였다. 나준이는 ‘근데 열화상 영상대로라면 우리가 배운 내용은 맞지가 않아. 철이 나무보다 더 열이 잘 전달되어야 되는데(발화 53)’라고 하였다. 학습한 지식으로 열화상 사진기 자료에서 관찰한 현상을 완전히 설명하지 못하였기 때문에 학습한 지식과 모순되는 대안적 개념 사이에서 혼란스러워하는 모습을 보였다.

모순을 해소하기 위해 학생들은 ‘금속의 온도 변화’에 초점을 맞춰 시각화 자료를 반복적으로 확인하였다. 이처럼 학생들의 관찰유형은 시각적으로 두드러지는 것에 먼저 주목하는 ‘단순관찰 및 무비교 관찰’에서 관찰하고자 하는 목표가 명확한 ‘정교화 관찰 및 비교관찰’로 변화하였다(박명희 등, 2005; Tomkins & Tunnicliffe, 2001). Table 15는 학생들이 금속의 온도변화에 초점을 맞춰 정교한 관찰을 한 끝에 금속의 온도가 상승하였음을 발견하는 과정과

Table 14. Part of conversation confused by the contradiction between the alternative concept created and the knowledge learned

발화 번호	연구 참여자	의사소통 내용	답화 유형
39	나준	금속은 온도가 따뜻해지지 않는데??	시각자료 관찰 및 공유(D1)
40	다희	그니까! (금속이) 열이 전달이 잘 안 되냐?	해석 2-1(C-W-D1)
41	가은	열 전달이 잘된다고!	해석 2-1에 대한 반박(R-W-D2)
42	라울	열 전달이 잘된다고 지난 시간에 배웠잖아. 어... 그런데... 금속은 왜 안 뜨거워져...	해석 2-1에 대한 반박(R-W-D2)
43	나준	그럼 왜 그런 거지?	
44	라울	그니까~	
45	나준	금속은 온도 변화가 없어. 나무가 더 온도가 전달이 잘 되는 게 아닐까?	해석 2-2(C-W-D1)
46	가은	잠깐 내가 생각하기에는	
47	나준	금속에 비해서, 나무가 철보다 열이 더 잘 전달돼.	해석 2-2(C-W-D1)
48	가은	애들아 생각 좀 하자, 생각할 시간을 좀 갖자.	
(중략)			
49	가은	나무가 열이 더 잘 전달되냐?	해석 2-2(C-W-D1)
50	다희	근데 내가... 학원에서 철이 나무보다 더 잘 전달된다고..	해석 2-2에 대한 반박(R-W-D2)
51	라울	그니까 저번 시간에도 금속이 열이 잘 전달된다고 그랬는데	해석 2-2에 대한 반박(R-W-D2)
52	나준	근데 왜 나무가 열이 더 잘 전달되냐고 내말은!	해석 2-2(C-W-D1)
(중략)			
53	나준	근데 열화상 영상대로라면 우리가 배운 내용은 맞지가 않아. 철이 나무보다 더 열이 잘 전달되어야 되는데	해석 2-2에 대한 반박(R-W-D2)

그 이후의 대화 내용 일부이다.

학생들은 열화상 사진기 자료를 앞뒤로 돌리며 관찰하다가 ‘어!? 살짝 더 온도가 높아진 거 같은데 살짝?(발화 57), ‘주변이 좀 흰해졌지(발화 61)’와 같이

금속토막의 색이 약간 밝아졌으며 온도가 미세하게 상승하였음을 발견하였다.

금속의 온도 상승을 발견한 것은 학생들이 금속과 나무의 열전도도에 대해 가지고 있던 혼란스러운 감

Table 15. The process of discovering the temperature rise of metal and part of conversation thereafter

발화 번호	연구 참여자	의사소통 내용	모순해소 및 지식의 정교화 과정
54	가은	야, 애들아 봐봐(영상 다시 관찰)	
55	나준	봐보자, 봐보자,	
56	가은	(손으로) 잡기 전과 잡은 다음을 돌려서 비교해봐	상세한 관찰 시도함(D1)
57	나준	어!? 살짝 더 온도가 높아진 거 같은데 살짝?	
58	다희	높아졌다고? 파란색인데?	
59	가은	금속토막을 봐봐. 요거랑 만진 다음을 비교해봐	금속 토막의 색깔이 밝아진 것을 발견함(D1)
60	다희	어!	
61	라울	주변이 좀 흰해졌지~	
62	다희	그러네!	
63	라울	이게 색깔이 흰해진 거면 이게. 여기 봐봐, 이거(색상 막대)를 봐, 이 시 커먼 파랑이에서 약간 흰한 파랑이로 갔으니까.	관찰한 현상으로부터 금속토막의 온도가 상승하였음을 발견함(C-W-D1)
64	가은	온도가 높아진 거. 어?(뭔가를 깨달은 듯함)	
65	나준	어, 잠깐만, 알 꺼 같애!	
66	가은	야야. 이거를(금속을) 손을 댔으니까 이게 온도가 (다희 말 시작함)	손에서 금속으로 열이 이동했다는 해석(1-1)에 합의함(C-W-D1)
67	다희	온도가 이 안에서(금속토막 내부에서) 움직이는 거야!	
68	나준	(다희와 동시에) 온도가 이 안에서 전달되는 거야!	
69	다희	열이 퍼지는 거지!	금속내부에서 열이 이동했음을 추론해냄(C-W-D1)
70	나준	그래. 옆으로 퍼져서 높아진 거야 온도가.	
71	라울	응~	
72	다희	(동시에)응~	
73	나준	그럼 이거 해결됐네~	
74	라울	어, 그러니까 금속의 온도가 변화 없음이 아니라는 거지.(활동지 내용 고침)온도가 올라감	질문 1에 대한 인지갈등 해소됨(C-W-D1)
75	가은	금속의 온도가 올라감.	
76	나준	전달돼서 올라간 거 아니야?	
77	가은	관찰한 거 기록하는 거니까 그냥 올라감이라고 해도 돼. 그럼 이제 나무를 해결할 차례인데.	
78	나준	나무는 왜~	
79	라울	야, 기다려, 하고 있어(쓰는 중이니 기다리라는 뜻)	
80	다희	애들아, 나무는, 나무는 이 안에서 (열이) 잘 퍼지지를 못해서 위에는 뜨거운데 주변은 퍼래 아직.	축열 현상 발견(C-W-D1)
81	나준	어, 그러네, 어, 우리가 배운 거 맞네!	
82	라울	그니까 금속이 전달이 더 잘 되는 거지.	인식론적 신념과 관찰한 현상간의 갈등 해소(C-W-D1)
83	나준	그니까~!(뭉시 기뻐함) 맞았어, 그게~ 야, 이거가지고 우리 몇 분이냐고 생겼어!	
(중략)			
84	나준	나무는 열이 잘 전달되지 않아서 여기만(윗면에만) 머물고 있는 거야	축열 현상 재확인(C-W-D1)

정을 해소하게 되는 계기가 되었다. 학생들이 ‘금속이 나무보다 열이 더 잘 전달된다’는 학습한 지식을 상기하였음에도 불구하고 ‘나무가 금속보다 더 열이 잘 전달된다’는 대안적 해석을 완전히 포기하지 못했던 이유는 손과 접촉한 뒤의 금속의 온도 변화가 전혀 없고 나무의 온도만 많이 상승했다고 파악했기 때문이었다. 그런데 정교한 관찰 끝에 금속 전체의 온도가 약간 상승한 것을 발견함으로써 ‘열이 퍼지는 거지!(발화 69)’, ‘옆으로 퍼져서 높아진 거야, 온도가(발화 70)’와 같이 ‘금속은 열이 잘 전달되는 물질이다’는 학습한 지식을 적용할 수 있게 된 것이다. 학습한 지식으로 관찰한 현상을 설명할 수 있게 되자 학생들은 마침내 ‘어, 그러네. 어, 우리가 배운 거 맞네!(발화 81)’, ‘그니까 금속이 전달이 더 잘되는 거지(발화 82)’와 같이 학습한 지식을 지지하는 모습을 보여주었다.

이처럼 열전도 현상을 시각화한 자료는 학생들이 맥락에 따른 특정 물체의 온도 변화를 정교하게 관찰하고 발견하게 함으로써 학습한 지식을 적용하는 기회를 제공하였으며 학습한 지식이 안정적으로 내면화되도록 도왔다.

7) ‘열전도도’에 대한 지식의 정교화

열이 전달되는 과정을 열화상 사진기로 시각적으로 자세히 관찰한 학생들이 ‘열전도도’에 대해 심도 있게 이해하게 되었다. Table 14에서 학생들은 손과 접촉한 뒤의 나무토막의 온도가 금속토막의 온도보다 상승한 것을 근거로 ‘나무가 금속보다 열이 더 잘 전달된다’고 해석하였었다(발화 45, 47, 49). 즉, 열이 잘 전달된다는 것의 의미를 ‘온도가 높은 물체와 접촉했을 때 온도가 더 많이 올라가는 것’이라고 본 것이다.

그런데 금속토막의 미세한 온도상승을 발견한 것을 계기로 학생들은 금속이 온도가 잘 전달되는 물질이기 때문에 금속토막 내부에서도 열을 잘 전달하여 옆면의 온도가 상승하였다고 해석하였다(발화 67, 69, 70). 열이 잘 전달된다는 것의 의미가 ‘물질 내부에서 열을 잘 이동시키는 것’으로 확장된 것이다. 심화된 지식은 시각화 자료를 더욱 정교하게 관찰하도록 도왔으며 학생들은 나무토막의 윗면과 옆면의 온도를 비교하며 관찰하였다. 나무토막의 부분별 온도 변화에 대한 정교한 관찰 끝에 학생들은 손과 접촉한 나무토막의 윗면만 온도가 상승하고 옆면

의 온도는 변화하지 않았다는 현상을 발견하였다(발화 80). 관찰한 현상에 대해 나준이는 ‘나무는 열이 잘 전달되지 않아서 여기만(윗면에만) 머물고 있는 거야(발화 84)’라며 ‘나무는 금속보다 열이 잘 전달되지 않는다’는 지식을 적용하여 축열 현상을 설명하였다. 즉, 열전도도가 작은 물질은 물질 내부에서 열을 잘 전달하지 않기 때문에 열이 한 곳에 축열될 수 있다는 것을 이해하게 되었다.

학생들의 ‘열전도도’에 대한 지식이 정교화되어 가는 과정을 도식화하면 Fig 4와 같다. 열화상 사진기로 열전도 현상을 시각화한 자료를 바탕으로 언어적 상호작용을 하는 과정에서 학생들의 ‘열전도도’에 대한 지식은 다음과 같이 확장되고 정교화되었다. 처음에는 열이 잘 전달된다는 것의 의미를 ‘외로부터 열을 잘 전달받는다’고만 이해하였다. 그러나 점차 ‘물질 내부에서도 열을 잘 전달한다’는 것으로 지식이 확장되었다. 그뿐만 아니라 ‘열을 잘 전달하지 않는 물질은 열이 한 곳에 모여 있어서 온도가 더 높게 나타난다’는 축열 현상을 열전도도로 설명하는 등 지식이 정교화되었다.

2. 시각화가 학생들의 열전도 관련 정신모형 변화에 미치는 영향

1) 탐구문제에 대한 서로 다른 해석

‘금속은 왜 차갑게 느껴질까?’라는 주어진 탐구 문제에 대해서 학생들은 Table 16과 같이 각자의 해석을 활발하게 제시하였다.

소집단 활동 과정에서 학생들은 ‘손과 접촉한 뒤 금속토막의 접촉면은 온도가 낮고 나무토막의 접촉면은 온도가 높다’는 동일한 내용을 강조하였으며 ‘아니, 내가 여태까지 말한 게 그거야(발화 91)’, ‘나 그거 뭘지 알아(발화 95)’와 같이 서로가 합의에 도달한 모습을 보였다. 그러나 소집단 활동을 녹화 및 녹음한 자료를 분석한 결과 학생들이 제시한 해석은 크게 두 가지 유형(유형 I, 유형 II)으로 나누어져 서로 일치하지 않았다.

유형 I은 금속토막 접촉면의 온도가 나무토막 접촉면의 온도보다 낮기 때문에 금속이 차갑게 느껴진다는 설명이다. 가온이와 나준이는 손과 접촉한 직후의 금속토막 접촉면과 나무토막 접촉면의 온도를 서로 비교하며 금속이 차갑게 느껴지는 이유를 설명

하였다. ‘손에서부터 전달되는 열이 밑에 쪽으로 다 퍼져서 금속은 차갑게 느껴지는 거고 나무는 열이 잘 전달이 안돼서 계속 열이 여기 모여 있어서 뜨겁게 느껴진다는 거지? 따뜻하게(발화 85/나준)’, ‘금속은 손의 열이 계속 퍼져나가서 차갑게 느껴지는 거고 나무는 손에 열이 계속 한 곳에 머물러 있으니 차갑게 느껴지는 거지(발화 94/가은)’ 등이 그러한 사례이다. 이러한 설명들은 ‘차가움을 느끼는 이유는 온도가 낮은 물체를 만졌기 때문이다’는 신념을 바탕으로 형성된 것이었다.

유형 II는 손바닥과 금속토막 또는 나무토막과의 접촉면에서 열이 이동하는 정도의 차이에 따라 차갑거나 미지근한 정도가 다르게 느껴진다는 설명이다. 다희와 라울이는 ‘온도가 서로 다른 두 물질이 접촉하면 온도가 높은 물질에서 온도가 낮은 물질로 열이 이동하여 서로 같은 온도가 된다’는 학습한 지식을 적용하여 설명하였다. 즉, 금속토막은 손과 접촉한 뒤에도 온도가 낮기 때문에 손과의 접촉면에서 열평형을 이루기 위해서 손에서 금속토막으로 열이 많이 이동하게 되어 차갑게 느끼고, 나무토막은 축열 현상으로 손과의 접촉면에서 빠르게 열평형을 이루기 때문에 손에서 빠져나가는 열이 적어서 미지근하게 느낀다는 것이다. ‘근데 나무는 열이 여기(윗부분)에 남아있잖아. (중략) 손에서 온도가 비슷하게 되려면 여기서(손에서) 가야 되는 온도가 좀 더 낮

고(적고), 여기는(금속은) 계속 차가워지니까 더 많은 온도가 이쪽으로 이동을 해야 되가지고 여기가(금속을 만진 손바닥이) 더 차갑게 되는 거지(발화 93/다희)’, ‘애네(나무와 손) 둘이 똑같은 온도를 만들기 위해서는 더 열을 적게 빠져나가고, 애는(금속) 열을 더 많이 빠져나가서(발화 97/라울)’ 등의 설명이 그러한 사례이다. 이러한 설명들은 ‘차가움을 느끼는 이유는 손에서 열이 많이 빠져나가기 때문이다’는 신념을 바탕으로 형성된 것이다.

이처럼 학생들은 서로가 같은 설명을 하고 있다고 생각하였으나 차가움을 느끼는 이유에 대한 신념의 차이에 따라 ‘금속이 차갑게 느껴지는 이유’를 설명하는 과정에서 열평형이나 열의 이동 등 학습한 지식을 적용하는 정도의 차이가 발생하였다. 이로 인해 학생들이 제시한 해석은 두 가지 유형(유형 I, 유형 II)으로 달라졌다.

2) ‘금속이 차갑게 느껴지는 이유’에 대한 각 학생들의 정신모형 변화

소집단 활동이 모두 끝난 후, 사후 면담에서 ‘금속이 차갑게 느껴지는 이유’에 대해 학생들이 가진 정신모형을 Table 8의 분석기준으로 분석한 결과, 촉감 온도계 모형, 체온 기준 모형, 열전도도를 고려한 체온기준 모형, 열의 이동 모형(과학적 모형) 등 총 4가지 유형으로 분류되었다.

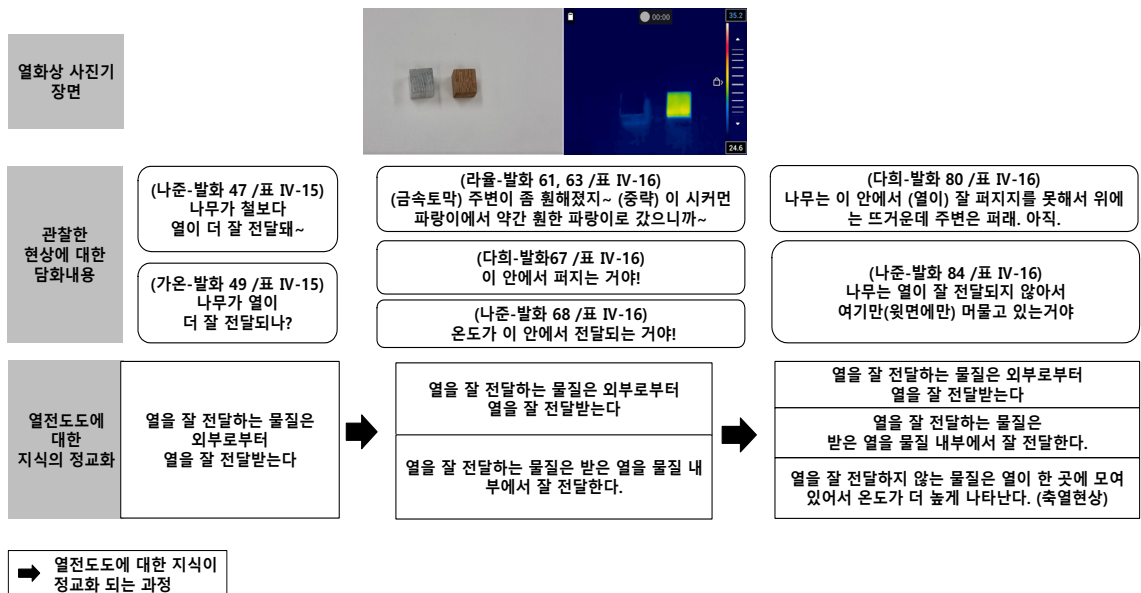


Fig. 4. The process of deepening students' knowledge about thermal conductivity

Table 16. Part of a student conversation on ‘Why does metal feel cold?’(Question 5)

발화 번호	연구 참여자	의사소통 내용	해석유형
85	나준	애들아, 그러면 지난번의 결론이 금속이 나무보다 열이 더 빨리 전달되기 때문에 손에서부터 전달되는 열이 밑에 쪽으로 다 퍼져서 금속은 계속 차갑게 느껴지는 거고 나무는 열이 잘 전달이 안돼서 계속 열이 여기 모여 있어서 뜨겁게 느껴지는 거지? 따뜻하게, 금속보다 따뜻하게 느껴지는 거지?	I
(중략)			
86	가은	내 생각은 그러니까 금속은 여기... 열전도가 잘 되니까 여기... 손에 열이 금속으로 가잖아. 손이 금속보다 더 뜨거우니까. 근데 여기(접촉면) 있던 열이 머물지 않고 금속은 퍼져나가잖아. 그러면 여기 위에는 계속 뜨거워지는 게 아니라 조금 낮아지니까 조금씩밖에 안 올라갈 거 아니야.	
87	라울	그러다가 (열이) 점점 쌓이겠지	
88	가은	나무는 점점 쌓이니까 미지근하게 느껴지는 거고 애는 계속 퍼지... (나준 말 시작함)	
89	나준	계속 퍼져버리니까	
90	라울	그래. 그걸 여태까지 했는데 왜 그러냐고.	
91	다희	아니, 내가 여태까지 말한 게 그거야. 내가 몇 분전에 말한 게 그거잖아.	
(중략)			
92	가은	금속은 열이 퍼지니까 천천히 올라가고 나무는 한곳에 머물러 있으니까 좀 더 뜨겁게 느껴지는 이게... 맞나?	I
93	다희	애는 여기서 계속 열이 전달 돼서(금속 윗부분에서 금속 옆 부분을 향해 손으로 쓸어내리며 설명) 위에게 계속 차갑게 느껴지는데, 근데 나무는 열이 여기(윗부분)에 남아 있잖아. 그래가지고 나무는 여기서 열이 더 잘 전달되지 않으니까 손에서 온도가 비슷하게 되려면 여기서(손에서) 가야 되는 온도가 좀 더 더 낮고(적고) 여기는(금속은) 계속 차가워지니까 더 많은 온도가 이쪽으로(금속으로) 이동을 해야 되가지고 여기가(금속만진 손바닥이) 더 차갑게 되는 거지.	II
94	가은	그러니까 간단하게 말하면은 금속은 손의 열이 계속 퍼져나가서 차갑게 느껴지는 거고 나무는 손에 열이 계속 한 곳에 머물러 있으니까 뜨겁게 느껴지는 거지~	I
95	나준	아, 나 그거 뭔지 알아	
96	라울	나도 뭔지 알아.	
(중략)			
97	라울	여기(나무를 가리키며) 이걸 만질 때는 (손바닥과 나무윗면을 번갈아 가며 볼펜으로 가리키며) 애네 둘이 똑같은 온도를 만들기 위해서 더 열을 적게 빠져나가고(손에서 나무막대를 향해 볼펜 움직임), 애는(금속 가리킴) 열을 더 많이 빠져나가서~	II
98	나준	그러니까 한마디로!	
99	라울	(눈을 위로 굴리며 생각하며 말함.) 손에서 열이 더 많이 빠져나가서 손에 이 네모부분이 차가워져서 차갑게 느끼는 거 아니야?	II

‘촉감 온도계 모형’은 물질마다 온도가 다르다고 생각하며 금속이 나무보다 온도가 낮기 때문에 차갑게 느껴진다고 설명하는 유형이다. 금속토막이나 나무토막과 접촉하는 손의 온도를 고려하지 않으며 열평형이나 열전도도 등을 고려하지 않는다. 차갑거나 미지근한 느낌이 곧 물체의 온도를 의미한다고 생각하는 유형이다.

‘체온 기준 모형’은 물질마다 온도가 서로 다르다고 생각하며 내 손의 온도를 기준으로 더 온도가 낮은 물체는 차갑게 느껴지고, 더 온도가 높은 물체는 뜨겁다고 느껴진다고 설명하는 유형이다. 손과 물체 간의 열의 이동이나 열평형, 물질의 종류에 따른 열

전도도 차이 등을 고려하지 않기 때문에 정교하게 설명하지는 못하는 한계가 있다.

‘열전도도를 고려한 체온 기준 모형’은 물질마다 열이 전달되는 빠르기가 다르기 때문에 손과 접촉했을 때 금속과 나무의 접촉면의 온도가 달라짐을 이해한다. 그러나 물체가 차갑게 느껴지는 이유를 손과 접촉한 뒤의 물체의 접촉면의 온도를 손의 온도와 비교하며 설명한다는 점에서 체온기준 모형과 비슷하다. 이 모형은 손과 접촉면사이의 열의 이동이나 열평형을 고려하여 설명하지 않는다는 한계가 있다.

‘열의 이동 모형’은 접촉한 물체 사이의 열의 이동

Table 17. Analysis of mental model and typification of ‘Why metal feels cold’

유형	접촉한 두 물체 사이의 온도 차이를 고려함	접촉한 물체간의 열평형을 고려함	물질의 열전도도 차이를 고려함	촉감의 차이를 열의 이동으로 설명함
촉감 온도계 모형	X	X	X	X
	물질마다 온도가 다른데 금속이 나무보다 온도가 낮기 때문에 차갑게 느껴진다.			
체온 기준 모형	O	X	X	X
	물질마다 온도가 다른데, 내 손의 온도보다 온도가 낮은 물체는 차갑게 느껴지고, 내 손의 온도보다 온도가 높은 물체는 따뜻하게 느껴진다.			
열전도도를 고려한 체온기준 모형	O	X	O	X
	물질마다 열이 전달되는 속도가 다르기 때문에 손과 접촉했을 때 금속과 나무의 접촉면의 온도가 서로 다르다. 내 손의 온도를 기준으로 금속과 나무의 접촉면의 온도가 높은지 낮은지에 따라 촉감이 달라진다.			
열의 이동 모형 (과학적 모형)	O	O	O	O
	서로 다른 두 물질이 접촉했을 때 접촉면에서는 열평형을 이룰 때까지 열이 이동한다. 물질마다 열이 전달되는 빠르기가 다르기 때문에 손과 접촉했을 때 물질의 종류에 따라 손에서 금속이나 나무쪽으로 단위시간당 이동하는 열의 양이 달라서 촉감차이가 생긴다.			

이나 열평형에 대한 지식을 적용하여 촉감의 차이를 설명하는 과학적 모형이다. 물질의 종류에 따라 열전도도가 다르기 때문에 손과 금속도막간의 접촉면과 손과 나무도막간의 접촉면에서 단위 시간당 이동하는 열의 양이 다르며 이것으로 인해 차갑거나 따뜻한 느낌의 차이가 생긴다고 설명하는 유형이다.

Table 18은 열화상 사진기로 열전도 현상을 시각화한 자료를 이용하여 ‘금속이 차갑게 느껴지는 이유’를 설명하는 소집단 활동에 참여하기 전과 후 학생들의 정신모형 변화 내용을 정리한 표이다.

사전 심층면담에서 가온이와 다희는 금속이 차갑게 느껴지는 이유를 ‘촉감 온도계’ 모형으로 설명하였다. 차갑거나 따뜻하게 느껴지는 정도 차이가 발생하는 이유에 대해 ‘온도가 낮으니까 차갑죠’, ‘온도가 다르니까요’ 등의 답변을 하여 ‘금속은 온도가 낮은 물질이다’는 비과학적 신념을 드러냈다.

(가온이의 사전심층면담 일부)

연구자 : 만져봤을 때 차가워서 금속이 나무보다 온도 자체가 낮을 거라고 생각하는 거야?

가 온 : 네. 온도가 낮으니까 차갑죠.

(중략)

연구자 : 그럼 왜 금속은 나무보다 차갑게 느껴질까?

가 온 : 다., 가지고 있는 온도가 다 다르니까요? 금속이 더 온도가 낮으니까?

(다희의 사전 심층면담 일부)

연구자 : 금속이 더 온도가 낮을 꺼라는 거야?

다 희 : 음. 책상에 나무부분이랑 금속부분이 있는데 쇠가 더 차갑잖아요.

연구자 : 음. 너가 만져본 경험에 의해서 금속이 온도가 더 낮을 거 같다...만지니까 차가워서... 그러면 차가움 이랑 따뜻한 촉감의 차이는 왜 생기는 걸까요? 왜 금속이 차갑지?

다 희 : 온도가 다르니까요. 금속이 온도가 낮으니까.

Table 18. Changes in students’ mental model categories for why metal feel cold

유형	정신모형 설명	사전	사후
촉감 온도계 모형	물질마다 온도가 다른데 금속이 나무보다 온도가 낮기 때문에 차갑게 느껴진다.	가온 다희	
체온 기준 모형	물질마다 온도가 다른데, 내 손의 온도보다 온도가 낮은 물체는 차갑게 느껴지고, 내 손의 온도보다 온도가 높은 물체는 따뜻하게 느껴진다.	나준 라울	
열전도도를 고려한 체온기준 모형	물질마다 열이 전달되는 속도가 다르기 때문에 손과 접촉했을 때 금속과 나무의 접촉면의 온도가 서로 다르다. 내 손의 온도를 기준으로 금속과 나무의 접촉면의 온도가 높은지 낮은지에 따라 촉감이 달라진다.		가온 나준
열의 이동 모형 (과학적 모형)	서로 다른 두 물질이 접촉했을 때 접촉면에서는 열평형을 이룰 때까지 열이 이동한다. 물질마다 열이 전달되는 빠르기가 다르기 때문에 손과 접촉했을 때 물질의 종류에 따라 손에서 금속이나 나무쪽으로 단위시간당 이동하는 열의 양이 달라서 촉감 차이가 생긴다.		다희 라울

사전 심층면담에서 나준이와 라울이는 금속은 체온보다 온도가 낮기 때문에 차갑게 느껴지고 나무는 체온과 비슷하기 때문에 미지근하게 느껴진다고 설명하는 ‘체온 기준 모형’을 구성하고 있는 것으로 나타났다. 나준이는 금속의 온도를 23℃로 예상하여 금속이 사람의 체온보다 낮기 때문에 차갑게 느껴진다고 하였다. 또한 나무의 온도를 금속보다 높은 26℃로 예상하였다가 체온과 비슷할 것이라고 수정하였으며 체온과 비슷한 물체는 미지근하게 느껴진다고 설명하였다. 라울이는 실내에 오랫동안 놓아두었다는 문제의 조건의 영향을 받아 두 물체의 온도가 비슷할 것이라고 하였으며 금속이 아주 약간 더 차갑게 느껴질 것이라고 예상하였다. 차갑거나 따뜻한 느낌의 차이가 발생하는 이유에 대해서는 체온보다 상대적으로 온도가 높으면 따뜻하게 느껴지고 체온보다 상대적으로 온도가 낮으면 차갑게 느껴질 것이라고 설명하였다. 그러나 열의 이동을 고려하지 않았다는 점에서 한계가 있었다.

(나준이의 사전 심층면담 일부)

연구자 : 그러면 금속을 만지면 차갑게 느껴지는 이유는 뭐야?
나 준 : 사람의 체온보다 온도가 낮으면 차갑게 느껴지고 사람의 체온보다 온도가 높으면 뜨겁게 느껴져요.
연구자 : 아, 그런데 금속이 지금... 23℃라서 차갑게 느끼는 거고 나무는... 어... 나무도 26℃ 정도라고 예상했으면 나무도 차가워야 되는 거 아니야?
나 준 : 사람 체온이... 어... 그러면 나무는 사람 체온이랑 비슷해요.

(라울이의 사전 심층면담 일부)

연구자 : 그러면 두 물체를 만져봤을 때 촉감은 어떨까?
라 울 : 촉감은,, 금속이 조금 차갑죠. 나무는 미지근하고. 근데 실내에 오랫동안 놓은 거니까... (금속이) 아주 약간만 차갑고 별로 차이 아닐 꺼 같아요.
(중략)
연구자 : 차갑거나 따뜻한 촉감의 차이는 왜 생길까?
라 울 : 손으로 만지는 거니까 제 손보다 차가우면 차갑게 느껴지지 않을까요? 추운데 있다가 따뜻한 데 오면 따뜻하게 느껴지고 따뜻한데 있다가 추운데 오면 춥게 느끼는 것처럼요. 어쨌든 뭔가 상대적이잖아요.

사후 심층면담에서 가온이와 나준이는 ‘열전도도를 고려한 체온 기준 모형’으로 ‘금속이 차갑게 느껴지는 이유’를 설명하였다. 손과 접촉한 후의 금속도막 윗면의 온도가 체온보다 낮기 때문에 차갑게 느

껴지고, 나무도막의 윗면의 온도는 체온과 비슷하기 때문에 미지근하게 느껴진다고 설명한 것이다. 이들은 설명과정에서 열전도도가 낮은 물질에 축열 현상이 나타나는 등 열전도도에 대한 정교화된 지식을 드러냈다. 그러나 차가움을 느끼는 이유에 대해 손과 물체간의 열의 이동이나 열평형을 고려하여 설명하기보다는 ‘접촉면의 온도가 손의 온도보다 낮으면 차갑게 느껴지고 접촉면의 온도가 손의 온도와 비슷하면 미지근하게 느낀다’고 하여 ‘체온기준 모형’에서 크게 발전하지 못한 모습을 보였다.

(가온이의 사후 심층면담 일부)

연구자 : 그러면 금속도막이 나무도막에 비해 차갑게 느껴지는 이유는?
가 온 : 금속의 접촉면은 손의 열을 금속 전체로 퍼져나가게 하고,, 퍼져나가게 해서 접촉면이 좀 더 차갑게 느껴지고 나무는 열이 계속 머물러 있으니까 나무는 좀 더 뜨겁게 느껴져요. 나무는 거의 열을 주변을 전달을 안 하니가 접촉면의 온도가 계속 올라가고 금속은 주변으로 열을 계속 전달시키니까 금손은 열이 다 퍼져서 계속 온도가 낮아서...
연구자 : 그럼 접촉면의 온도가 더 낮기 때문에 금속이 더 차갑게 느껴진다는 거야?
가 온 : 네. 그때 친구들과 실험한 결과로는...
연구자 : 접촉면의 온도가 낮으면 왜 차갑게 느껴지는데?
가 온 : 그게... 손보다 더 차가우니까, 상대적으로 좀 차가워서요. 나무는 손이랑 비슷하니까 미지근한데 금속은 손보다 좀 차가우니까.

(나준이의 사후 심층면담 일부)

연구자 : 금속이 나무에 비해 차갑게 느껴지는 이유는?
나 준 : 금속의 열이 옆면이나 아랫면으로 다 퍼져서 계속 차갑게 느껴지고 나무는 열이 윗면에 계속 고여 있어서 계속 따뜻하게 느껴지는 거예요.
연구자 : 그러면 나무는 윗면이 온도가 높은 상태여서 따뜻하게 느끼고 금속은 윗면의 온도가 계속 낮아서 차갑게 느낀다는 거네요?
나 준 : 네. 왜냐하면 손의 열이 닿으면 나무는 손의 열이 바로 옆으로 퍼지지 않아서 금속보다는 더 온도가 더 높은 걸로 느껴지는 거 같아요.
연구자 : 차가움이나 뜨거움은 왜 느껴지는 걸까요?
나 준 : 우리의 체온보다 온도가 낮으면 차갑게 느껴지고 우리의 체온보다 높으면 뜨겁게 느껴져요.

사후 심층면담에서 다희와 라울이는 ‘열의 이동모형’을 구성하여 ‘금속이 차갑게 느껴지는 이유’를 설

명하였다. 다희와 라울이도 금속과 나무의 열전도도 차이에 따라 손과 접촉한 뒤의 금속토막과 나무토막 윗면의 온도가 달라지는 현상을 근거로 금속이 차갑게 느껴지는 이유를 설명하였다. 그러나 금속토막과 나무토막 접촉면의 온도 차이로 인해 손에서 나무토막보다 금속토막으로 더 많은 열이 이동하여 금속이 차갑게 느껴진다고 설명한 점에서 ‘열전도도를 고려한 체온기준 모형’보다 발전된 과학적 모형을 구성하였다.

(다희의 사후 심층면담 일부)

연구자 : 금속토막이 나무토막에 비해 차갑게 느껴지는 이유는 뭔가요?

다 희 : 금속은 열전도도가 커서 열이 계속 다른 데로 퍼지니까 손이 닿은 부분이 계속 차가워지는데 나무는 열이 빨리 퍼지지 못하니까 손이 닿은 부분에서 열이 머물기 때문에 금속은 계속 차가워지는데 나무는 빨리 차가워지지 않아요.

연구자 : 어, 그러면 접촉면 온도에 따라서 차갑거나 따뜻한 게 다르게 느껴진다는 거네?

다 희 : 네. 어. 근데 그게 다가 아니고 금속은 열전도도가 커가지고 계속 손에서 열이 빠져나가잖아요. 그러면 계속 열전도도가 크니까 계속 전체가 따뜻해지기 위해서 손이 닿은 부분이 계속 차가워지니까 손에서 열이 계속 빠져나가서 손이 계속 차가워지고 나무는 열이 잘 퍼지지 않아서 저기 손이 닿은 부분이 계속 따뜻해져 있으니까 손에서 열이 많이 나가지 않아요.

(라울이의 사후 심층면담 일부)

연구자 : 금속이 나무에 비해 차갑게 느껴지는 이유는?

라 울 : 어... 나무토막보다 금속토막에서 열이 더 잘 전달되니까 같은 시간 내에 손에서 더 많은 열을 빼앗아가기 때문이에요.

연구자 : 손에서 열이 빠져나가니까?

라 울 : 네. 어... 금속은 이렇게 손에 닿을 때 손에 있던 열이 더 빠르게 전체로 퍼져나가고 나무토막은 어... 더... 천천히 열이 전달되가지고 위에 아직 머물러 있으니까 어... 똑같은 온도로,, 손이랑 윗면이랑 똑같은 온도로 되기 위해서 금속 토막이 열을 더 많이 빼어가야지 되고요. (중략) 나무는 근데 윗면에 그 열이 천천히 전달이 되가지고 윗면에 열이 아직 머물러 있으니까 뭔가 열을 조금 빼어가서 금속을 만진 게 더 차갑게 느껴지는 거 같아요.

사전 면담에서 학생들은 ‘촉감 온도계 모형’이나 ‘체온 기준 모형’을 드러냈으며 금속이 나무에 비해

온도가 낮을 것이라고 예상했었다.

사후 면담에서 학생들은 ‘열전도도’에 대한 정교화된 지식을 바탕으로 금속토막이나 나무토막의 접촉면의 온도 차이를 설명하였다. 그러나 ‘차가움을 느끼는 이유’에 대해 ‘체온보다 온도가 낮은 물체를 만지면 차갑게 느껴지고 체온보다 온도가 높은 물체를 만지면 뜨겁게 느껴진다’ 또는 ‘손에서 열이 많이 빠져나갈수록 차갑게 느껴진다’는 등의 신념의 차이를 나타냈다.

이러한 신념의 차이는 ‘열평형’이나 ‘열의 이동’과 같은 학습한 지식을 적용하는 정도의 차이를 가져왔으며 학생들이 ‘금속이 차갑게 느껴지는 이유’에 대해 ‘열전도도를 고려한 체온기준 모형’이나 ‘열의 이동 모형’과 같이 서로 다른 정신모형을 구성하도록 이끌었다.

IV. 결론 및 제언

본 연구는 열화상 사진기를 활용하여 열전도 현상을 시각화한 자료가 소집단 활동 과정에서 초등학생들에게 미치는 교육적 효과성에 대해 알아보고자 하였다. 연구 결과로부터 열화상 사진기로 열전도 현상을 시각화한 자료는 다음과 같은 효과가 있다는 것을 알았다.

첫째, 열화상 사진기로 열전도 현상을 시각화한 자료는 학생들이 시각적으로 명확하게 지각할 수 있도록 돕는 효과가 있었다. 정확한 시각 정보를 바탕으로 초등학생의 소집단 활동에서 논의의 초점을 명확히 하는 긍정적인 효과가 있었다.

둘째, 내재적인 동기를 유발하는 효과가 있었다. 흥미, 신기함과 놀라움 등의 긍정적인 감정을 불러일으켜 내재적 동기유발을 도왔다. 또한 정교한 관찰과 발견을 통한 모순 해소는 혼란스러움 등의 부정적인 인식적 감정을 감소시켜 내재적 동기를 지속시킬 수 있게 도왔다.

셋째, 학생들이 활발히 의사소통하며 소집단 활동에 적극적으로 참여하도록 돕는 효과가 있었다. 열화상 사진기 자료에서 획득한 풍부한 시각 정보는 관찰한 현상의 해석이나 반박의 근거로 활용되어 활발한 의사소통이 이루어지도록 촉진하였다.

넷째, 사고의 도약과 통찰을 가능하게 하는 효과가 있었다. 여러 가지 물체와 주변 공기의 온도를 시각적으로 관찰할 수 있게 하여 ‘상온과의 열평형’

과 같은 학습하지 않은 지식으로의 사고의 도약을 이끌었다. 시각화 자료는 학생들이 손과 접촉한 후의 금속이 나무에 비해 온도 상승이 적음으로 인해 막다른 골목에 이르렀을 때 ‘열전도도가 큰 물질은 물질 내부에서도 열을 잘 전달한다’는 관점의 전환과 지식의 확장을 도와 모순을 해소하고 통찰을 일으키도록 도왔다.

다섯째, ‘금속이 차갑게 느껴지는 이유’에 대한 학생들의 정신모형이 발달하도록 돕는 효과가 있었다. 열화상 사진기 자료는 금속토막과 나무토막의 초기 온도와 실험맥락에 따른 온도 변화 과정을 직접 눈으로 확인할 수 있게 하여 ‘금속은 온도가 낮은 물질이다’는 비과학적 신념을 변화시키고, 열전도도에 대한 지식이 정교화되도록 도와주었다. 이렇게 변화된 신념과 지식을 바탕으로 학생들은 각자의 초기 정신모형을 평가하고 수정하여 정신모형을 발달시켰다.

본 연구의 결론을 바탕으로 다음과 같이 제언하고자 한다.

첫째, 열화상 사진기를 활용한 시각화 자료가 학생들의 정신 모형의 변화 및 과학적 모형구성에 미치는 영향에 대한 추가적인 질적 사례 연구를 제안한다. 예를 들면, 열화상 사진기를 활용하면 에너지 전환 과정에서 에너지의 일부가 마찰열 등의 형태로 변화하는 과정을 시각적으로 확인할 수 있기 때문에 에너지 보존법칙에 대한 과학적 모형을 구성하는데 도움을 줄 수 있다. 이처럼 ‘열전도’가 아닌 다른 개념에 대해 학생들이 과학적인 모형을 구성하는 과정에서 열화상 사진기가 미치는 영향에 대한 추가적인 후속연구를 제안한다.

둘째, 열화상 사진기 이외의 다른 발전된 도구를 교육 현장에 도입하여 시각화의 효과성을 검증하는 추가적인 연구를 제안한다. 물리량의 특성에 따라 비가시적인 현상을 시각화할 수 있는 도구가 달라진다. 다양한 방법으로 비가시적 현상을 시각화할 수 있으면 학생들에게 효과적인 학습 자료를 제공할 수 있을 것이다.

셋째, 중등 학생을 대상으로 열화상 사진기를 열전도 학습에 활용하는 시도를 해볼 필요가 있다. ‘열’에 대한 학생들의 지적발달 수준에서 차이가 있으므로 정신모형 유형 변화를 본 연구의 결과와 연계하여 살펴볼 수 있을 것이다. 또한 열화상 사진기 자료가 금속이 차갑게 느껴지는 이유를 설명하기

위해 열의 이동량을 정량적으로 측정하고 분석하는 실험 연구도 가능할 것이다.

참고문헌

- 나지연, 송진웅(2012). 초등학생의 과학 담화에서 나타나는 몸짓의 유형과 특징. *초등과학교육*, 31(4), 450-462.
- 문성숙, 권재술(2008). 개념구조를 이용한 인지갈등에 대한 새로운 논의. *한국과학교육학회지*, 28(5), 359-382.
- 박명희, 박윤복, 권유주(2005). 초등학생의 어항 관찰활동에서 나타나는 관찰의 유형과 그 변화. *초등과학교육*, 10(2), 175-182.
- 박정우, 유준희(2018). 소리의 전달 모형구성 수업에서 나타난 개인모형 구성 단계 중 정보의 흐름과 모둠모형 구성의 유형. *한국과학교육학회지*, 38(3), 393-405.
- 안성국, 박일우(2018). 원형 캡 레이저포인터와 다색 LED를 활용한 렌즈에 의한 빛의 굴절 실험 개발 및 적용. *현장과학교육*, 12(2), 203-217.
- 양찬호, 김수현, 조민진, 노태희(2016). 물질의 입자성에 대한 모형 구성 과정에서 나타나는 소집단 토론과 전체 학급 토론의 특징. *한국과학교육학회지*, 36(3), 361-369.
- 유희원, 함동철, 차현정, 김민석, 김희백, 유준희, 박현주, 김찬중, 최승언(2012). 달의 위상 변화에 대한 과학적 모형 구성 수업에서 나타나는 과학 영재들의 모형 생성 및 발달 과정. *영재교육연구*, 22(2), 291-315.
- 이기람, 박일우, 주은정(2020). 초등 저학년 학생들에게 과학 경험은 충분할까?: 초등 저학년 학생의 과학에 대한 인식과 과학 경험에 대한 사례 연구. *초등과학교육*, 39(4), 475-493.
- 이경민(2016). 통찰 발생과정에 있어 막다른 골목과 재구조화의 기능에 대한 고찰. *창의력교육연구*, 16(3), 1-15.
- 이선경(2015). 과학학습 개념변화. 서울: 서울대학교출판문화원.
- 이정희(2009). 근대과학에서 시각적 재현의 의미. *철학논총*, 55, 299-322.
- 허민아, 오필석, 한문현(2019). 과학적 지식 탐색 과정에서 초등학생들의 인식적 정서와 이를 이끄는 인지적 평가 요인 탐색. *초등과학교육*, 38(4), 496-509.
- Arnheim, R. (1974). *Art and visual perception: A psychology of the creative eye*. Berkley: Univ of California Press.
- Chiou, G. L., & Anderson, O. R. (2009). A study of undergraduate physics students' understanding of heat conduction based on mental model theory and an ontology-process analysis. *Science Education*, 94(5),

- 825-854.
- Chiou, G. L. (2013). Reappraising the relationships between physics students' mental models and predictions: An example of heat convection. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 9(1), 1-15.
- Chittleborough, G. D., Treagust, D. F., Mamiala, T. L., & Mocerino, M. (2005). Students' perceptions of the role of models in the process of science and in the process of learning. *Research in Science & Technological Education*, 23(2), 195-212.
- Cook, M. P. (2006). Visual representations in science education: The influence of prior knowledge and cognitive load theory on instructional design principles. *Science Education*, 90(6), 1073-1091.
- Corbin, J., & Strauss, A. (2014). *Basics of qualitative research: Techniques and procedures for developing grounded theory*. CA, US: Sage publications.
- Driver, R., Guesne, E., & Tiberghien, A. (Eds.). (1985). *Children's idea in science*. Milton Keynes, England: Open University Press.
- Eden, C., Ackermann, F., & Cropper, S. (1992). The analysis of cause maps. *Journal of Management Studies*, 29(3), 309-324.
- Eppler, M. J., & Burkhard, R. A. (2004). *Knowledge Visualization: Towards a New Discipline and its Fields of Application*, ICA Working Paper 2/2004, Institute for Corporate Communication, Università della Svizzera italiana.
- Ezquerro, A., & Ezquerro-Romano, I. (2018). From Thermosensation to the Concepts of Heat and Temperature: A Possible Neuroscientific Component. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 14(12).
- Galison, P. (1997). *Image and logic: A material culture of microphysics*. Chicago: University of Chicago Press.
- Gilbert, J. K., Boulter, C., & Rutherford, M. (1998). Models in explanations, Part 1: Horses for courses. *International Journal of Science Education*, 20(1), 83-97.
- Gilbert, J. K. (2004). Models and modelling: Routes to more authentic science education. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 2(2), 115-130.
- Harrison, A. G., Grayson, D. J., & Treagust, D. F. (1999). Investigating a grade 11 student's evolving conceptions of heat and temperature. *Journal of Research in Science Teaching*, 36(1), 55-87.
- Hoffman, D. D. (2000). *Visual intelligence: How we create what we see*. NY: W.W. Norton & Company.
- Hynd, C., & Guzzetti, B. J. (1998). When knowledge contradicts intuition: Conceptual change. In C. Hynd (Eds.), *Learning from text across conceptual domains* (pp. 139-164). Mahwah, NJ: LEA.
- Jacobson, R. (1999). *Information design*. Boston, MA: MIT Press.
- Jordan, B., & Henderson, A. (1995). Interaction analysis: Foundations and practice. *The journal of the Learning Sciences*, 4(1), 39-103.
- Justi, R. S., & Gilbert, J. K. (2002). Modelling, teachers' views on the nature of modelling, and implications for the education of modellers. *International Journal of Science Education*, 24(4), 369-387.
- Justi, R., & Van Driel, J. (2005). The development of science teachers' knowledge on models and modelling: Promoting, characterizing, and understanding the process. *International Journal of Science Education*, 27(5), 549-573.
- Kozma, R. (2003). The material features of multiple representations and their cognitive and social affordances for science understanding. *Learning and Instruction*, 13(2), 205-226.
- Lee, G. H., Shin, J. H., Park, J. Y., Song, S. H., Kim, Y. S., & Bao, L. (2005). An integrated theoretical structure of mental models: Toward understanding how students form their ideas about science. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 25(6), 698-709.
- Lee, V. R. (2010). Adaptations and continuities in the use and design of visual representations in US middle school science textbooks. *International Journal of Science Education*, 32(8), 1099-1126.
- Mayer, R. E., Bove, W., Bryman, A., Mars, R., & Tapangco, L. (1996). When less is more: Meaningful learning from visual and verbal summaries of science textbook lessons. *Journal of Educational Psychology*, 88(1), 64.
- Mayer, R. E. (1999). *The promise of educational psychology: Learning in the content areas* (Vol. 1). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Mayer, R. E., & Moreno, R. (2003). Nine ways to reduce cognitive load in multimedia learning. *Educational Psychologist*, 38(1), 43-52.
- Mathewson, J. H. (1999). Visual-spatial thinking: An aspect of science overlooked by educators. *Science Education*, 83(1), 33-54.
- Mehrabian, A. (2009). *Nonverbal communication*, New Jersey: Aldine Transaction.

- Nisbett, R., & Ross, L. (1980). Human inference: Strategies and shortcomings of social judgment. Englewood cliffs, NJ: Prentice-Hall
- Ohlsson, S. (1992). Information-processing explanations of insight and related phenomena. *Advances in the Psychology of Thinking*, 1, 1-44.
- Pavio, A. (1986). Mental representations: A dual-coding approach. NY: Oxford University Press.
- Rapp, D. N. (2005). Mental models: Theoretical issues for visualizations in science education. In J. K. Gilbert (Eds.), *Visualization in science education* (pp. 43-60). Netherlands: Springer.
- Roth, W. M., Bowen, G. M., & McGinn, M. K. (1999). Differences in graph-related practices between high school biology textbooks and scientific ecology journals. *Journal of Research in Science Teaching*, 36(9), 977-1019.
- Sampson, V., & Clark, D. (2009). The impact of collaboration on the outcomes of scientific argumentation. *Science Education*, 93(3), 448-484.
- Schnotz, W. (2002). Commentary: Towards an integrated view of learning from text and visual displays. *Educational Psychology Review*, 14(1), 101-120.
- Tomkins, S. P., & Tunnicliffe, S. D. (2001). Looking for ideas: observation, interpretation and hypothesis-making by 12-year-old pupils undertaking science investigations. *International Journal of Science Education*, 23(8), 791-813.
- Toulmin, S. E. (2006). 논변의 사용(The Uses of Argumentation). (고현범 · 임건태 역). 서울: 고려대학교 출판부. (원서 출판 2003).
- Van Helden, A. (1977). The invention of the telescope. *Transactions of the American Philosophical Society*, 67(4), 1-67.
- Von Aufschnaiter, C., Erduran, S., Osborne, J., & Simon, S. (2008). Arguing to learn and learning to argue: Case studies of how students' argumentation relates to their scientific knowledge. *Journal of Research in Science Teaching*, 45(1), 101-131.
- Vosniadou, S., & Brewer, W. F. (1994). Mental models of the day/night cycle. *Cognitive Science*, 18(1), 123-183.
- Vygotsky, L. (1978). Interaction between learning and development. *Readings on the Development of Children*, 23(3), 34-41.
- Weisberg, R. W. (2006). *Creativity: Understanding innovation in problem solving, science, invention, and the arts*. Hoboken, NJ: Wiley.

이가람, 서울인현초등학교 교사(Lee, Ga Ram; Teacher, Seoul Inhun Elementary School)

주은정, 서울교육대학교 교수(Ju, Eunjeong; Professor, Seoul National University of Education)

† 박일우, 서울교육대학교 교수(Park, Il-Woo; Professor, Seoul National University of Education)