

달 위상 변화의 시각화 자료에서 SBF 질문에 따른 예비교사와 초등학생의 시선 이동 차이

고민석 · 양일호[†] · 김오범[†] · 임성만[†]
(신남성초등학교) · (한국교원대학교)[†]

The Differences in Eye Movement of Pre-service Teachers and Elementary School Students in SBF Question about a Visual Material of the Change on the Lunar Phases

Ko, Minseok · Yang, Ilho[†] · Kim, Obeom[†] · Lim, Sungman[†]
(Shinnamsung Elementary School) · (Korea National University of Education)[†]

ABSTRACT

Purpose of this study is to analyze eye movements of pre-service teachers and elementary students about a visual material of the change on the lunar phases. Eye-Tracker was used for analysis for eye-fixation time and eye movement at the structure, behavior, function question on the visual material. The Results were as follows. First, the pre-service teacher checked the visual materials from a holistic perspective depending on the function questions and fixed eye-fixation on the moon of the behavior question concerned. On the contrary, elementary school student only checked function of the moon located in the upper part and eye-fixation focus was spread here and there regardless of the questions. Second, the pre-service teacher gazed at the sun, earth and moon in a consecutive order depending on the questions to identify their spatial relations and checked location of the moon related to the question. On the contrary, the elementary school student did not view relations between earth, sun and moon from a spatial perspective. These findings indicate that the pre-service teacher conjures up the mechanism of the change on the lunar phases and confirms it in visual materials by visualizing change on the lunar phase model from earth's point of view while the elementary school student fails to take advantage of visual materials to visualize it from earth's point of view.

Key words : the change on the lunar phases, visual material, eye-movement

I. 서 론

1. 연구의 필요성 및 목적

지구과학교육에서 달 위상 변화의 원인에 대한 개념을 이해하기 위해서는 태양, 지구, 달의 운동 메커니즘에 대한 시공간적인 추론 능력이 요구되며(Rivet *et al.*, 2012), 많은 학생들이 이해하는데 어려움을 겪는 부분이다(Abell *et al.*, 2001; Lightman & Salder, 1993; Zeilik & Bisard, 2000). 이에 지구과

학교육에서 이러한 공간적 관계의 추론에 대한 어려움을 줄이기 위해 그림, 삽화, 물리적 모형과 같은 다양한 시각화 자료들이 사용되고 있다(Kastens & Rivet, 2008; Katz *et al.*, 2005). 하지만 달, 지구, 태양의 시스템의 관계를 나타내는 시각화 자료를 보고, 모든 학생들이 달, 지구, 태양이 운동하는 관계를 적절하게 유추하는 것은 아니다(Rivet *et al.*, 2012). 달 위상 변화의 운동 관계를 이해하기 위해서는 조망적 사고와 정신적 심상의 조작과 같은 내

적 시각화의 능력이 필요하며, 시각화 자료를 보고 정신적으로 달 위상 변화의 운동 관계를 떠올릴 수 있어야 한다(Orion *et al.*, 1997, Ramadas, 2009; Rivet *et al.*, 2012). 이에 이 연구에서는 달 위상 변화 원인을 설명하기 위해 사용하는 시각적 자료를 예비교사와 학생들이 어떻게 내적으로 시각화하여 이해하고 있는지 탐색해 보고자 한다.

과학학습에서 시각화는 크게 내적 시각화와 외적 시각화의 두 가지로 의미로 설명된다. 내적 시각화는 개인이 가지고 있는 내적 표상으로서 정신 심상을 떠올리는 과정이며, 학생들의 정신모델을 이해하고 구조를 설명하는데 사용된다(Johnson-Laird, 1985). 정신 심상(이하 심상)이란 정신적으로 이미지를 떠올리고, 다루는 것을 의미한다(Kosslyn, 1994). 이러한 심상은 사물의 모양, 색깔 등을 떠올리는 것과 위치 관계를 떠올리는 것, 움직임의 경험을 떠올리는 것 등을 포함한다(Gabbard, 2012; Glenberg, 2009; Moulton & Kosslyn, 2009). 즉, 내적 시각화란 정신적으로 사물에 대한 심상을 떠올리고 조작하는 것을 의미한다. 반면, 외적 시각화는 표, 그래프, 그림과 같이 외적으로 표상된 시각화 자료를 의미하며, 학습 과정에서 복잡한 개념이나 현상에 대한 학습자들의 이해를 돕기 위해 상징적인 단서를 제공하고, 비계를 설정해 주어 복잡한 상호작용 메커니즘의 특별한 구성요소를 어떻게 설명하는가에 대한 방법을 제공한다(Uttal & O'Doherty, 2008).

Hegarty(2004)는 내적 표상으로서 시각화와 외적 표상으로서의 시각화의 관계에 대해 외적 시각화가 내적 시각화를 대체할 수 있으나, 외적 시각화 자료에 대한 이해는 내적 시각화에 의존하며, 내적 시각화와 외적 시각화의 연결이 논쟁과 인지적 능력을 향상시킨다고 보고하였다. 또한 Hegarty(2003)는 외적 표상이 항상 내적 표상을 대체하는 것은 아니라고 설명하였다. 즉, 외적으로 표상된 시각화 자료를 보고 학생들이 떠올리는 내적 표상은 차이가 있을 수 있으며, 시각화 자료에 대한 이해를 확인하기 위해서는 내적 표상에 대한 이해를 기반으로 해야 한다.

하지만 지금까지 과학교육에서 시각화 자료에 대한 연구는 시각화 자료의 양식이나 사용에 대해서 주로 연구되어 왔으며, 외적 표상인 시각화 자료를 학생들이 실질적으로 어떻게 확인하고 있는지에 대한 연구는 제한적이다. 이러한 점에서 안구

운동(eye-movement) 분석은 달 위상 변화 원인의 시각화 자료에 대해 학생들의 이해를 확인하기 위한 효과적인 방법이 될 수 있다. 시선 이동은 학생들의 인지 활동을 이해하는 중요한 단서가 될 수 있으며(Glenstrup & Engell-Nielsen, 1995), 이에 최근 과학교육에서 안구운동추적기를 이용하여 학습자들의 인지과정을 연구하고 있다. 과학교과서에 제시되어 있는 사진(Slykhuis *et al.*, 2005), 표(Choi & Shin, 2012), 문제와 그래프(Robert *et al.*, 2006), 글과 그림(Mason *et al.*, 2013) 등에 대한 학습자들의 시선 이동의 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 관찰 문제(Shin & Shin, 2013), 교수행동(Byeon *et al.*, 2011)에 관한 연구에도 사용되어지고 있다. 하지만 지금까지 과학학습에서 안구운동 추적의 연구는 관찰, 분류, 자료 해석 등 다양한 방법으로 자료에 대한 시선 이동의 현상을 확인하였으나, 과학학습에서 개념과 관련하여 학생들의 이해를 뒷받침할 증거를 제시하지는 못하였다.

이에 이 연구에서는 달 위상 변화의 시각화 자료에 대한 내적 시각화를 확인하기 위한 증거로서, 구조-작용-기능에 관한 질문에 따라 외적 시각화 자료를 어떻게 응시하고 있는가를 살펴보고자 하였다. Goel *et al.*(1996)은 상호 학습 환경에서 복잡한 시스템을 나타내는 외적 지식 표상으로서, 구조-작용-기능(structure-behavior-function) 틀의 사용을 제안하였으며, 과학교육에서 경험적 연구들을 통해 복잡한 시스템에 대한 구조, 작용, 기능 이해를 측정하는 분석 방법과 외적 지식 표상의 종류에 따른 질문과 답을 분석할 수 있는 구조, 작용, 기능 분석틀을 개발하였다(Hmelo-Silve *et al.*, 2000; Hmelo-Silver *et al.*, 2007). 복잡한 시스템에서 보이지 않는 인과적 과정은 여러 수준의 추상화를 가지며, 한 가지 수준의 인과적 과정은 더 낮은 수준의 구성요소 사이의 상호작용을 통해 나타낸다(Chi, 2005). 이러한 복잡한 시스템 상황에서 학생들의 사고를 이해하기 위해 구조, 작용, 기능에 대한 분석이 효과적이다(Hmelo-Silve *et al.*, 2000; Hmelo-Silver & Pfeffer, 2004; Hmelo-Silver *et al.*, 2007; Liu & Hmelo-Silver, 2009).

이에 이 연구에서는 달 위상 변화 원인의 시각화 자료에 대한 학생들의 내적 시각화의 증거로 구조, 작용, 기능의 외적 지식 표상 틀에 따른 질문에서 예비교사와 초등학생의 시선 이동을 분석하여, 초

등학생의 시선 이동이 예비교사의 시선 이동과 어떠한 차이를 보이는지 비교하여 보고자 한다.

2. 연구 문제

이에 이 연구에서 다룰 구체적인 연구문제는 다음과 같다.

- 가. 예비교사와 초등학생은 구조-작용-기능에 관한 질문에 따라 시각화 자료의 응시 시간에 어떠한 차이를 보이는가?
- 나. 예비교사와 초등학생들은 구조-작용-기능에 관한 질문에 따라 시선 이동 패턴에 어떠한 차이를 보이는가?

II. 연구 방법

1. 연구 대상

이 연구에서는 달 위상 변화의 시각화 자료에 대한 초등학교 6학년 학생들의 시선 이동의 특징을 분석하기 위해 대전광역시 소재하는 E초등학교 6학년 학생 20명을 연구 대상으로 선정하고, 일정 수준의 인지적 능력을 가지고 있으며, 달 위상 변화에 대해 공통교육과정을 통해 학습한 K대학교 초등예비교사 20명을 비교 대상으로 선정하였다. 연구대상의 선정은 초등학교 6학년 학생 중 지구와 달의 위상 변화 원인에 대해 학습하였고, 사전 질문지를 통한 개념 조사에서 공통적으로 달 위상 변화의 원인이 달이 지구 주위를 공전하기 때문이라는 개념을 알고 있는 학생들을 대상으로 하였다. 연구대상으로 선정된 6학년 학생 20명은 공통적으로 달의 위상 변화 원인에 대해 달이 지구 주위를 공전하기 때문이라는 함축적 개념을 제시하였으나, 그림을 통해 달 위상 변화 원인을 구체적으로 나타내는 데는 어려움을 나타내었다. 비교대상인 예비교사들은 사전 질문지를 통한 개념 조사에서 모두 달 위상 변화 원인에 대해 올바른 개념적 모델을 가지고 있었으며, 달 위상 변화의 원인을 설명하기 위해 적절한 그림을 표상하여 나타내었다. 연구에 참여한 예비교사와 학생들은 모두 연구에 자발적으로 참여하였고, 사전에 연구의 목적과 방법에 대해 충분히 안내한 후 연구에 대한 동의를 구하였으며, 초등학생의 경우 본인 및 보호자의 동의를 함께 받았다. 연구대상 중 실험 자료의 획득률이 80%

보다 낮은 대상을 제외하고, 최종적으로 22~24세의 예비교사 16명과 초등학교 6학년 학생 18명을 연구 대상으로 선정하였다.

2. 과제 개발

1) 과제 선정

이 연구는 시선 이동 추적 장치를 통해 지구과학 교육에서 사용되는 달 위상 변화 시각화 자료에 대한 예비교사와 초등학생의 응시시간 및 시선 이동 차이를 알아보려고 함이다. 이에 달 위상 변화에 대한 시각화 자료로 최초 Fig. 1의 왼쪽 사진과 같이 현행 초등학교 교과서에 제시된 달 위상 변화에 대한 시각화 자료를 사용하고자 하였다. 이유는 교과서에 제시된 달 위상 변화에 대한 시각화 자료는 자연 세계의 태양과 지구, 달의 운동 메커니즘에 대한 이해를 돕기 위해 사용되고 있기 때문에, 복잡한 시스템 각각의 요소들과 기능, 작용 메커니즘을 확인할 수 있다. 하지만 초등학생 10명을 대상으로 예비 투입한 결과, 교과서에 제시된 시각화 자료는 시선 이동 추적 장치를 통해 분석하기에는 어려운 점이 나타났다. 교과서에 제시된 시각화 자료의 경우 지구와 달 영역에 겹치는 부분이 있어서 지구와 달 중 어느 부분을 응시하였는지 정확하게 구분하기 어려웠기 때문이다. 이에 교과서의 시각화 자료와 같은 구조와 기능, 작용을 나타내되, 지구와 달이 겹치지 않고, 태양, 지구, 달 영역 사이의 구분이 명확하게 되는 시각화 자료를 선정하였다. 최종적으로 사용된 달 위상 변화 시각화 자료는 Fig. 1의 오른쪽 사진과 같다.

2) 질문의 구성

Hmelo-Silver *et al.*(2007)의 연구에서 순환계와 수족관 시스템에 대한 전문가와 예비교사, 중학생들

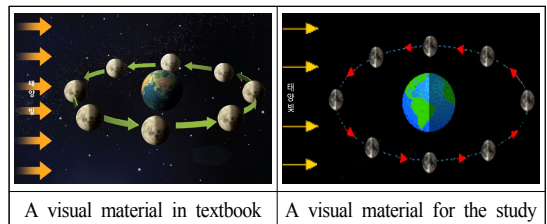


Fig. 1. A visual material for the study

의 지식 표상의 방법과 차이점을 알아보기 위해 구조-작용-기능 체제에 따른 개방형 질문지를 사용하였다. 시스템의 구조를 알아보기 위해 “구조에는 무엇이 있는가?”, “순환계는 무엇으로 이루어져 있는가?”라는 질문이 사용되었으며, 기능 지식을 끌어내기 위해 “수족관에서 물고기는 무엇을 하는가?”, “폐가 하는 일은 무엇인가?”라는 질문이 사용되었다. 또한 작용 메커니즘을 파악하기 위해 “여과장치가 멈추었을 때 어떤 일이 생기는가?”, “숨을 어떻게 쉬는가?”라고 질문하였다. 이 연구에서는 달 위상 변화에 대한 구조-작용-기능 지식 표상을 알아볼 수 있도록 Hmelo-Silver *et al.*(2007)의 구조-작용-기능 체제에 따른 질문을 수정하여 사용하였으며, 과학교육전문가 10인이 참여한 3차례의 세미나를 통해 사용된 질문이 구조, 작용, 기능의 확인을 위해 적절한지 검토되어, 2차례 수정, 보완이 이루어졌다. 달 위상 변화 시각화 자료에 대한 구조, 작용, 기능 체제를 알아보기 위해 최종적으로 사용된 질문은 구조에 관한 질문 1개와 기능에 관한 질문 1개, 작용에 관한 질문 2개로 구성되었다. 구조를 알아보기 위한 질문은 “다음 그림에서 볼 수 있는 것은 무엇인가요?”, 기능을 확인하기 위한 질문은 “태양 빛이 달의 어느 면을 비추나요?”로 구성하였으며, 마지막으로 태양과 달, 지구 운동의 작용 메커니즘을 확인하기 위해 “상현달은 어느 위치일 때 볼 수 있을까요?”, “초승달은 어떤 위치일 때 볼 수 있을까요?”라고 질문을 구성하였다.

실험에 사용된 달 위상 변화 시각화 자료에 대한 시선추적 실험은 다음과 같이 설계되었다. 과제의 설계는 Eye-Tracker 전문가 1인, 과학교육전문가 10인이 참여한 3차례의 세미나를 통해 과제 설계의 타당도를 확인하였으며, 총 3회의 예비 투입을 통해 수정 보완하였다. 개발된 패러다임은 Fig. 2와 같다. 먼저 보정(calibration) 단계에서 화면의 목표점 9곳을 분할 지정하여 학생들의 시선을 보정하였다. 마우스 클릭으로 화면이 넘어가면 지시문(instruction)이 나타난다. 지시문의 내용은 특별히 관찰할 내용을 미리 지시문을 통해 언급하는 것은 피하고자 ‘다음 질문에 따라 그림을 살펴보세요.’로 하였다. 지시문이 3초 동안 제시된 후 다음 화면으로 넘어가며 ‘다음 그림에서 볼 수 있는 것은 무엇인가요?’로 구조에 관한 질문이 4초 동안 제시된 후, 마우스나 키보드의 조작 없이 달 위상 변화에 관한 시각화 자료가 제시된다. 연구 참여자가 제시된 시각화 자료를 확인하며, 질문에 대한 답을 떠올릴 수 있도록 충분한 시간이 주어지며, 연구 참여자 스스로 답을 인지하였다고 판단이 되면 키보드를 클릭하여 다음 화면으로 넘어가도록 측정 패턴을 구성하였다. 이후, 동일한 절차로 기능에 관한 질문, 시각화 자료, 작용에 관한 질문, 시각화 자료 순으로 과제 패러다임이 설계되었다. 실험 상황이 끝나면 ‘감사합니다.’라는 지시문이 3초 나타나고, 측정이 끝나도록 Fig. 2와 같이 구성하였다.

3) 과제 설계

3. 자료 수집

이 연구에서 사용한 아이트래킹 하드웨어는 Tobii

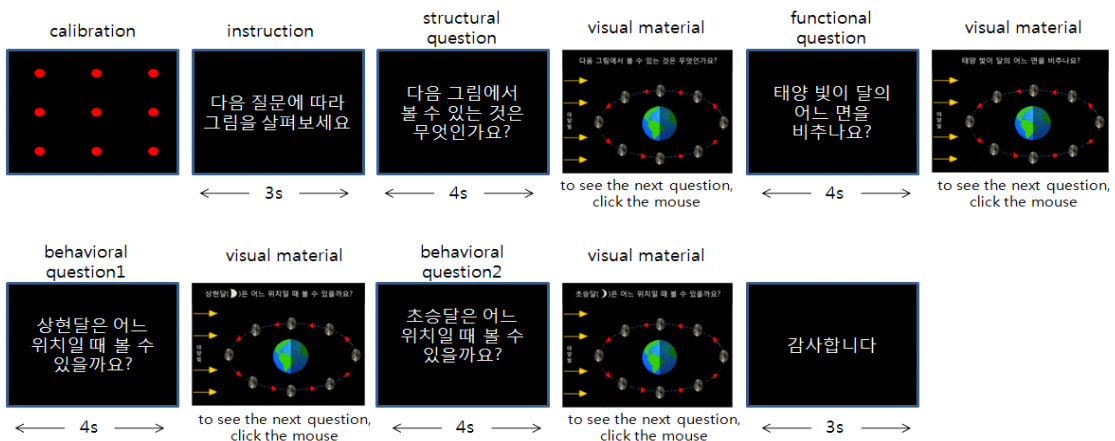


Fig. 2. A paradigm of the task

1750, 측정 소프트웨어는 Tobii studio 2.2.8, frame rate는 50Hz이다. Calibration은 화면상의 점이 9개의 위치로 이동할 때 응시하는 시선을 추적하여 설정되며, 약 20초 정도 소요된다. 17인치 TFT 모니터를 보는 상황에서 시선 이동의 측정이 이루어지고, 머리 움직임의 오차 보정이 가능(<1 degree)하다. 측정을 위한 장소는 준비 장소와 측정 장소로 분리하였으며, 준비 장소에서 연구 참여자들에게 측정 과정, 주의 사항 등에 대한 사전 안내를 실시하였다. 연구 참여자들에게 영향을 미칠 수 있는 실험에 대한 불안감을 줄여주고, 실험 장비에 대한 이해를 통해 실험 외적인 변인들을 최소화시켜 주고자 하였다. 측정 장소에는 calibration 상태 유지를 위해 움직임을 최소화할 수 있는 바퀴가 없는 의자를 사용했다. 학생이 모니터 앞에 앉으면 안내 교사는 옆에서 화면에 나타나는 start calibration 상태를 확인하며, 학생이 앉은 의자로 눈의 높낮이와 화면으로부터의 거리(60cm)가 최적화되도록 도왔다. 준비 및 측정 장소에서 안내 교사가 연구 참여자에게 제공하는 설명은 사전에 작성한 시나리오를 통하여 이루어져 다수의 연구 참여자 간의 실험 조건을 일치시키고자 하였다. Calibration이 제대로 이루어지지 못한 경우에는 재시도하였으며, calibration을 통과한 후에 개발한 관찰 과제 패러다임을 제시하였다. 이와 같은 과정의 Eye-Tracker에 의한 온라인 데이터 수집 후에는 이를 보완하고자 오프라인 데이터로서 질문지를 통해 달 위상 변화 원인에 대한 학생들의 개념을 조사하였다. 질문지의 내용은 여러 날 동안 달의 모양이 변하는 까닭을 설명하고, 음력 8일에 해당되는 태양과 지구, 달의 위치를 그려보는 것이었다.

4. 자료 분석

이 연구를 위해 측정된 자료는 Tobii Studio 3.1.3 프로그램을 이용하여 응시시간과 이동경로를 분석하

였다. Tobii 3.1.3 프로그램은 fixation count, fixation duration 등 시선 이동에 대한 수량적 데이터와 피험자의 시선 이동에 대한 시각적 데이터(visualizing eye tracking data)로는 heat map, gaze plot, cluster 등의 질적 데이터를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 fixation의 기준을 정하고자 Velocity-Threshold Identification (I-VT) filter 알고리즘을 사용하였다(Salvucci & Goldberg, 2000). 시각령에서 현재의 시간적 정보가 이용 가능해지기 전에 60ms가 필요하고, 눈이 움직이도록 하는 지시가 보내졌을 때부터 saccade가 시작하기까지 30ms가 소요된다(McConkie et al., 1985). 따라서 본 과제에서는 Robert et al.(2006)의 연구와 같이 100ms를 fixation 최소 설정 기준(minimum fixation duration)으로 정하였다. 분석 프로그램을 통해 수집한 데이터들은 SPSS 12.0 for Windows 통계 프로그램을 사용하여 처리하였다.

또한 달 위상 변화 시각화 자료의 구성 요소인 태양과 지구, 달(12시 방향의 달을 기준으로 시계방향으로 달1, 달2, 달3, 달4, 달5, 달6, 달7, 달8의 AOI 선정)에 대한 응시시간 및 시선 이동을 분석하기 위해 Fig. 3과 같이 각각의 질문과제에 동일하게 관심영역(AOI)을 선정하였다.

설정된 관심 영역에 따라 예비교사와 초등학생의 응시시간 차이를 알아보기 위해 heat map을 분석하였으며, 이를 통계적으로 검증하기 위해 비모수통계방법인 Mann-Whitney의 순위합검정을 실시하였다. 또한 달 위상 변화 시각화 자료에 대한 예비교사와 초등학생의 전체적인 시선 이동 패턴 차이를 확인하기 위해 태양, 지구, 달1, 달2, 달3, 달4, 달5, 달6, 달7, 달8 AOI 영역을 첫 번째 응시한 시간의 평균을 분석하여, 예비교사 그룹과 초등학생 그룹의 각 질문에 대한 시선 이동 차이를 비교하였다.

III. 연구 결과 및 논의

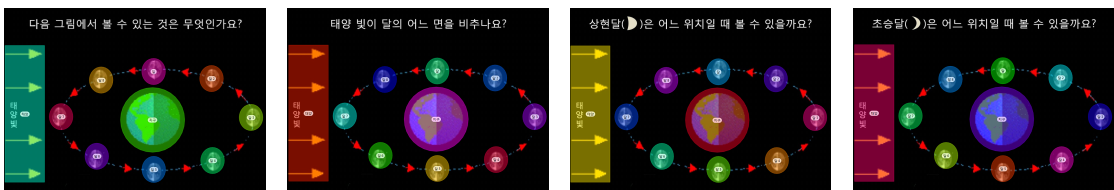


Fig. 3. A selection of AOI at the task

1. 예비교사와 초등학생의 달 위상 변화 시각화 자료에 대한 응시 시간 차이

1) 예비교사와 초등학생의 전체 응시시간 차이

예비교사와 초등학생의 달 위상 변화 시각화 자료에 대한 응시시간은 각각 39.06초와 33.1초 동안 응시하였다(Table 1). 전체 응시시간에서는 상대적으로 예비교사의 응시시간이 길었으나, 이를 통계적으로 유의미한 차이가 있는지 확인하기 위해 비모수통계방법인 Mann-Whitney의 순위합검정 결과, 예비교사와 초등학생의 전체 응시 시간에는 유의미한 차이가 나타나지 않았다. 이와 같은 결과는 예비교사와 초등학생이 과제 패러다임에서 주어진 질문에 따라 시각화 자료에 주의 집중하여 응시하는 전체 시간에 큰 차이가 없음을 의미한다.

하지만 질문 유형에 따른 전체 응시시간을 비교하면, 예비교사는 구조에 관한 질문(9.69초)에 비해 작용에 관한 질문(10.72초)에 대한 응시시간이 길게 나타났으나, 초등학생은 구조에 관한 질문(10.23초)에 대한 응시 시간이 가장 길었고, 작용질문(8.69초)과 기능에 관한 질문(6.15초)에 대한 시각화 자료의 응시 시간은 상대적으로 짧게 나타났다. 예비교사는 구조보다 작용에 관한 질문에서 더 오랫동안 시각화 자료를 응시하였으나, 상대적으로 초등학생은 작용에 관한 질문보다 구조에 관한 질문에서 더 오랫동안 시각화 자료를 응시하였다. 이와 같은 결과를 통해 달 위상 변화 시각화 자료의 메커니즘을 알고 있는 예비교사의 경우 작용 측면을 집중하여 응시하고, 초등학생은 달 위상 변화 시각화 자료의 작용 메커니즘을 이해하지 못하고 있기 때문에 시선이 분산되어 나타났다고 분석할 수 있다. 또 이와 같은 결과는 예비교사들이 상향식 주의보다는 하향식 주의를 통해 지각이 이루어진 것이라 할 수

있다. 즉, 지식과 같은 ‘하향식 주의’를 유발시키는 자극에 의해 시선이 이동하였다고 할 수 있다(Choi & Shin, 2012).

2) 구조에 관한 질문에 대한 예비교사와 초등학생의 응시시간 차이

달 위상 변화 시각화 자료에서 구조에 관한 질문은 전체 시각화 자료의 구조를 이루고 있는 구성요소가 무엇인지 확인하고자 하는 질문이었다. 구조에 관한 질문에 대한 예비교사와 초등학생의 응시시간 차이를 알아보기 위해 heat map을 분석하였다. Heat map에서 붉은색은 화면의 어떠한 부분을 가장 오랫동안 응시한 최대응시시간을 나타내며, 최대응시시간을 최대값으로 하여 응시 시간의 상대적인 분포를 색으로 나타낸 것이다. 구조에 관한 질문에 대한 예비교사와 초등학생의 heat map을 살펴보면 Fig. 4와 같다. 예비교사와 초등학생 간의 뚜렷한 차이가 나타나지 않으며, 태양과 지구, 달의 전체적인 부분을 고루 응시하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이를 통계적으로 유의미한 차이가 있는지 확인하기 위해 비모수통계방법인 Mann-Whitney의 순위합검정 결과, 구조에 관한 질문에 따라 예비교사와 초등학생의 구조에 관한 질문에 따른 응시 시간에는 관심영역별 유의미한 차이가 나타나지 않았다.

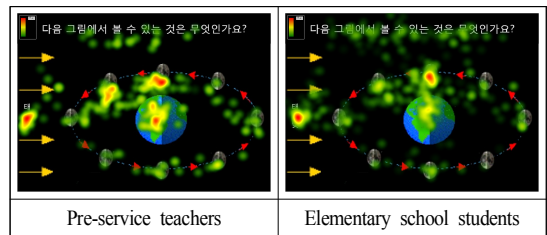


Fig. 4. Heat maps about the structure question

Table 1. The total eye-fixation time about a visual material of the change on the lunar phases

| Group | The total eye-fixation time in SBF question (unit: s) | | | | Total means (unit: s) |
|-----------------------------------|---|------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|
| | S-question M(SD) | B-question M(SD) | F-question 1 M(SD) | F-question 2 M(SD) | |
| Pre-service teachers (N=16) | 9.69(3.76) | 10.72(9.18) | 10.21(9.76) | 8.44(4.96) | 39.06 |
| Elementary school students (N=18) | 10.23(6.29) | 8.69(3.54) | 8.03(3.39) | 6.15(2.46) | 33.1 |

3) 기능에 관한 질문에 대한 예비교사와 초등학생의 응시시간 차이

예비교사와 초등학생이 시각화 자료에서 기능적인 측면을 어떻게 확인하는지 알아보기 위해 “태양 빛이 달의 어느 면을 비추나요?”라는 달 위상 변화 시각화 자료의 특정한 기능을 확인하는 질문을 하였다. 먼저 heat map을 분석해 보면 Fig. 5와 같다. 예비교사의 경우, 태양과 지구, 여러 위치의 달을 고루 응시하고 있었으나, 초등학생은 주로 태양과 지구, 상단 부분에 위치한 달을 주로 응시하고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 달에 대한 응시시간을 비교해 보면, 예비교사는 평균 2.82초 동안 달을 응시하였으며, 초등학생은 평균 1.53초 동안 달을 응시하였다. 이를 세부적으로 살펴보기 위해, 여러 위치의 달과 태양, 지구에 각각 AOI를 설정하여 응시 시간을 비교한 결과는 Table 2와 같다. 예비교사는 기능에 관한 질문에 따라 전체 AOI를 고루 응시하고 있는 반면, 초등학생은 주로 시각화 자료의

달7, 달8, 달1 AOI를 중점적으로 응시하고 있었다. 이를 통계적으로 유의미한 차이가 있는지 확인하기 위해 비모수통계방법인 Mann-Whitney의 순위합 검정 결과 달4, 달5, 달6 AOI에서 유의미한 차이를 나타내었으며($p < .01$), 예비교사가 초등학생보다 달 4, 달5, 달6 AOI를 더 오랫동안 응시하고 있었다. 이와 같은 결과는 ‘구조’에 관한 질문에서와 같이 예비교사들은 지니고 있는 지식에 의한 하향식 주의가 이루어져 시선이 끌고루 이루어진 것을 알 수 있다(Choi & Shin, 2012). 아울러 Rommelse *et al.* (2008)이 아이트래킹을 통하면 피험자가 관심을 가지고 본 지점의 대상을 확인할 수 있다고 한 것처럼, 예비교사들은 태양 빛이 달의 어느 면을 비추는지에 대해 달의 각 위치에 따른 위상을 체크하고 있는 것을 확인할 수 있으나, 초등학생들은 달의 위상 변화를 정확히 이해하고 있지 않은 상태에서 직관적으로 달 2, 3, 4, 5, 6은 태양 빛이 비추지 않는 것으로 인식하고 있는 있음을 알 수 있었다.

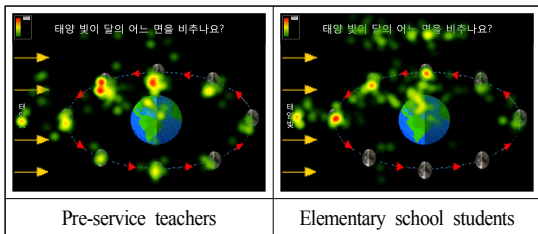


Fig. 5. Heat maps about the function question

4) 작용에 관한 질문에 대한 예비교사와 초등학생들의 응시시간 차이

작용에 관한 질문은 달 위상 변화 원인에 대한 메커니즘이 포함된 질문으로 작용에 관한 질문에 따라 예비교사와 초등학생이 달 위상 변화 시각화 자료에서 메커니즘을 어떻게 확인하고 있는지 알아보기 위해 “상현달은 어느 위치일 때 볼 수 있을

Table 2. A difference between pre-service teacher and elementary school student's eye-fixation time at the AOI about the function question

| Area of task's AOI | Eye-fixation time (unit: s) | | Z | Sig. |
|--------------------|-----------------------------|----------------------------------|--------|--------|
| | Pre-service teachers M(SD) | Elementary school students M(SD) | | |
| Moon1 | 0.51(.65) | 0.44(.49) | -.139 | .889 |
| Moon2 | 0.25(.29) | 0.08(.13) | -1.795 | .073 |
| Moon3 | 0.12(.20) | 0.11(.18) | -.121 | .904 |
| Moon4 | 0.19(.19) | 0.01(.04) | -3.446 | .001** |
| Moon5 | 0.32(.37) | 0.07(.15) | -2.823 | .005** |
| Moon6 | 0.25(.35) | 0.03(.10) | -2.528 | .011** |
| Moon7 | 0.43(.34) | 0.37(.48) | -.965 | .334 |
| Moon8 | 0.75(.74) | 0.42(.30) | -1.073 | .283 |
| Earth | 0.62(.51) | 0.64(.56) | -.000 | 1.000 |
| Sun | 0.64(.82) | 0.36(.42) | -.623 | .551 |

** $P < .01$

까요?”와 “초승달은 어느 위치일 때 볼 수 있을까요?”라고 질문하였다.

(1) 작용에 관한 질문 1에 대한 응시시간 차이

작용에 관한 질문 1(상현달은 어느 위치일 때 볼 수 있을까요?)에 대한 heat map을 살펴보면(Fig. 6), 예비교사의 경우 주로 상현달과 하현달 위치를 응시하고 있는 반면, 초등학생은 시각화 자료의 상단부 달을 응시하고 있음을 알 수 있다. 이를 세부적으로 살펴보기 위해 응시시간을 비교하여 보면 Table 3과 같다. 예비교사는 작용에 관한 질문에 따라 달1 AOI를 평균 0.62초, 달5 AOI를 평균 1.24초 응시하고 있었으며, 초등학생은 시각화 자료의 윗부분인 달1, 달2, 달8 AOI를 각각 0.74초, 0.45초, 0.41초 응시하고 있었다. 이를 통계적으로 유의미한 차이가 있는지 확인하기 위해 비모수통계방법인 Mann-Whitney의 순위합검정 결과, 달2, 달5, 달8, 달6 AOI 영역에서 예비교사와 초등학생이 유의미한 차이를 나타내었다($p < .01$). 이를 통해 예비교사

의 경우, 작용에 관한 질문에 따라 시각화 자료에서 상현달 위상에 대한 표상을 확인하고 있는 반면, 초등학생의 경우 상현달 위상에 대한 표상을 확인하지 못하고 있음을 알 수 있다. 또한 예비교사와 초등학생은 지구 AOI 영역에 대해서도 유의미한 차이를 보이며, 예비교사의 응시시간이 초등학생의 응시시간보다 더 긴 것을 확인할 수 있었다($p < .01$). 이는 예비교사가 상현달의 위상을 확인하기 위해, 즉 하향식 주의를 통해 지구와 달의 위치 관계를 고려하여 시선 운동을 하였기 때문으로 보인다(Choi & Shin, 2012).

(2) 작용에 관한 질문 2에 대한 응시시간 차이

작용에 관한 질문 2(초승달은 어느 위치일 때 볼 수 있을까요?)에 대한 heat map을 비교하여 보면, Fig. 7과 같다. 예비교사는 작용에 관한 질문에 따라 초승달의 위상을 확인하기 위해 달6 AOI를 중점적으로 응시하고 있었으나, 초등학생은 시각화 자료의 윗부분인 달1, 달2, 달7, 달8 AOI에 주로 시선이 머물고 있는 것으로 나타났다. 이를 통계적으로 유의미한 차이가 있는지 확인하기 위해 비모수통계방법인 Mann-Whitney의 순위합검정 결과(Table 4), 달1, 달6, 달7 AOI에서 예비교사와 초등학생이 유의미한 차이를 나타내었다($p < .01$). 달1과 달7 관심영역에 대해서는 예비교사보다 초등학생의 응시시간이 길었으며, 달6 관심영역에 대해서는 초등학생보다 예비교사의 응시시간이 길었다. 작용에 관

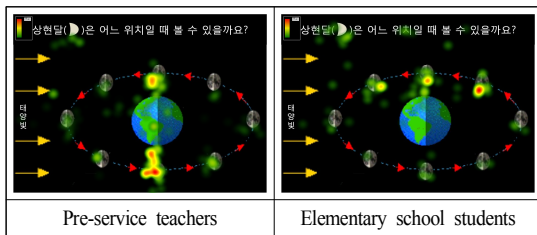


Fig. 6. Heat maps about the behavior question 1

Table 3. A difference between pre-service teacher and elementary school student's eye-fixation at the AOI about the function question 1

| Area of task's AOI | Eye-fixation time (unit: s) | | Z | Sig. |
|--------------------|-----------------------------|----------------------------------|--------|-------|
| | Pre-service teachers M(SD) | Elementary school students M(SD) | | |
| Moon1 | 0.62(.82) | 0.74(.90) | -.955 | .340 |
| Moon2 | 0.07(.20) | 0.45(.95) | -2.325 | .020* |
| Moon3 | 0.10(.31) | 0.23(.33) | -1.800 | .072 |
| Moon4 | 0.43(1.36) | 0.10(.21) | -.325 | .745 |
| Moon5 | 1.24(1.13) | 0.38(.45) | -2.379 | .017* |
| Moon6 | 0.33(1.24) | 0.07(.16) | -.903 | .366 |
| Moon7 | 0.44(1.31) | 0.14(.26) | -.364 | .716 |
| Moon8 | 0.33(.91) | 0.41(.47) | -2.168 | .030* |
| Earth | 1.28(1.07) | 0.61(.76) | -2.419 | .016* |
| Sun | 0.10(.15) | 0.12(.13) | -.524 | .600 |

* $P < 0.05$

한 질문 1의 결과와 같이 예비교사는 초승달의 위상을 확인하고 시선이 집중되는 반면, 초등학생은 초승달의 위상을 확인하지 못하고, 주로 상단부 달을 응시하며, 시선이 분산되는 모습을 보였다.

이상과 같은 결과를 통해 예비교사들이 달 위상 변화 시각화 자료에 대한 구조, 기능, 작용에 관한 질문을 모두 이해하고, 자료를 확인하고 있는 반면, 초등학생은 기능과 작용에 관한 질문에 대해 자료를 확인하는데 어려움을 겪고 있음을 알 수 있었다. 이는 선행 연구에서 복잡한 시스템 상황에서 전문가들이 구조, 작용, 기능의 관점에서 이해하는 반면, 초심자들은 주로 구조적인 측면에 중점을 두어 이해하며, 복잡한 시스템의 인과적 작용 측면에 대해서는 이해가 부족함을 보고한 것과 일치하는 내용이다(Hmelo-Silver *et al.*, 2000; Hmelo-Silver *et al.*, 2007). 이 연구에서 연구대상으로 선정한 6학년 학생은 이미 달 위상 변화에 대해 학습을 하였음에도 대부분의 학생들이 기능과 작용에 관한 질문에 따라 적절하게 시각화 자료를 확인하지 못하고 있음

을 시선 이동 추적을 통해 확인할 수 있었다. 즉, 학생들의 이해를 돕기 위해 외적 표상인 시각화 자료를 제공하여도 효과적인 교사의 설명이나 전략이 사용되지 않는다면, 달 위상 변화의 운동 관계를 내적으로 시각화하기 어려움을 알 수 있다.

2. 예비교사와 초등학생의 달 위상 변화 시각화 자료에 대한 시선 이동 차이

달 위상 변화 시각화 자료에 대한 시선 이동을 세부적으로 분석하기 위해 태양, 지구, 달 AOI 영역 중 첫 번째로 시선이 고정된 곳에 도달한 평균 시간을 비교하여 응시한 시간 순서에 따라 경로를 표시하였다(Fig. 8). 각각의 질문에 대한 예비교사와 초등학생의 전체 응시시간이 6~11초 사이임을 고려할 때, 처음 0~5초 동안의 시선 이동을 기준으로 분석하였다.

먼저 구조질문에 대해 0~5초 동안 첫 번째 시선이 고정된 곳은 예비교사의 경우, 태양, 지구, 달8, 달1 AOI 순으로 나타났으며, 초등학생의 경우 지구, 태양, 달8, 달1 AOI 순으로 나타났다. 예비교사는 태양에서 시작하여 지구, 달 순서로 시각화 자료를 확인하는 반면, 초등학생은 지구에서 시작하여 태양, 달 순서로 시선이 이동되는 것을 알 수 있다. 둘째, 기능에 관한 질문에 대해 0~5초 동안 첫 번째 시선이 고정된 곳은 예비교사의 경우, 지구, 태양, 달8, 달7, 달1, 달5, 달6, 달3, 달4 순으로 나타났으며, 초등학생은 달8, 태양, 달1, 달7, 태양, 지구,

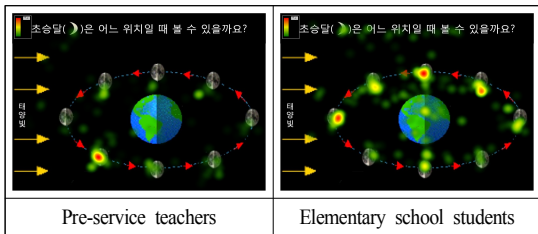


Fig. 7. Heat maps about the behavior question 2

Table 4. A difference between pre-service teacher and elementary school student's eye-fixation at the AOI about the function question 2

| Area of task's AOI | Eye-fixation time (unit: s) | | Z | Sig. |
|--------------------|-------------------------------|-------------------------------------|--------|--------|
| | Pre-service teachers M(SD) | Elementary school students M(SD) | | |
| Moon1 | 0.16(.34) | 0.52(.73) | -2.471 | .013** |
| Moon2 | 0.18(.48) | 0.34(.51) | -1.440 | .150 |
| Moon3 | 0.17(.49) | 0.30(.39) | -1.252 | .210 |
| Moon4 | 0.28(.50) | 0.08(.13) | -.947 | .344 |
| Moon5 | 0.50(.90) | 0.20(.33) | -.414 | .679 |
| Moon6 | 1.15(1.43) | 0.16(.26) | -2.472 | .013** |
| Moon7 | 0.19(.44) | 0.49(.50) | -2.032 | .042* |
| Moon8 | 0.44(1.16) | 0.52(.96) | -1.589 | .112 |
| Earth | 0.46(.39) | 0.78(1.06) | -.207 | .836 |
| Sun | 0.12(.21) | 0.15(.32) | -.083 | .934 |

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

달8, 지구 순으로 나타났다. 예비교사가 5초 동안 달의 위치에 따라 전체적인 기능을 확인하고 있는 반면, 초등학생은 주로 시선이 시각화 자료의 좌측 상단 부분에 위치한 달을 응시하면서 이동하였으며, 달1~8의 전체적인 기능을 확인하지 않고 있었다. 셋째, 작용에 관한 질문 1에 대해 0~5초 동안

첫 번째 시선이 고정된 곳은 예비교사의 경우 지구, 달7, 태양, 달5 순으로 나타났으며, 초등학생은 달1, 달3, 달2, 달8 순으로 나타났다. 예비교사가 5초 동안 지구, 태양, 달을 확인하면서 달5(상현달)로 시선이 이동한 반면, 초등학생은 주로 시각화 자료의 상단 부분에 위치한 달을 응시하면서 시선이 이동

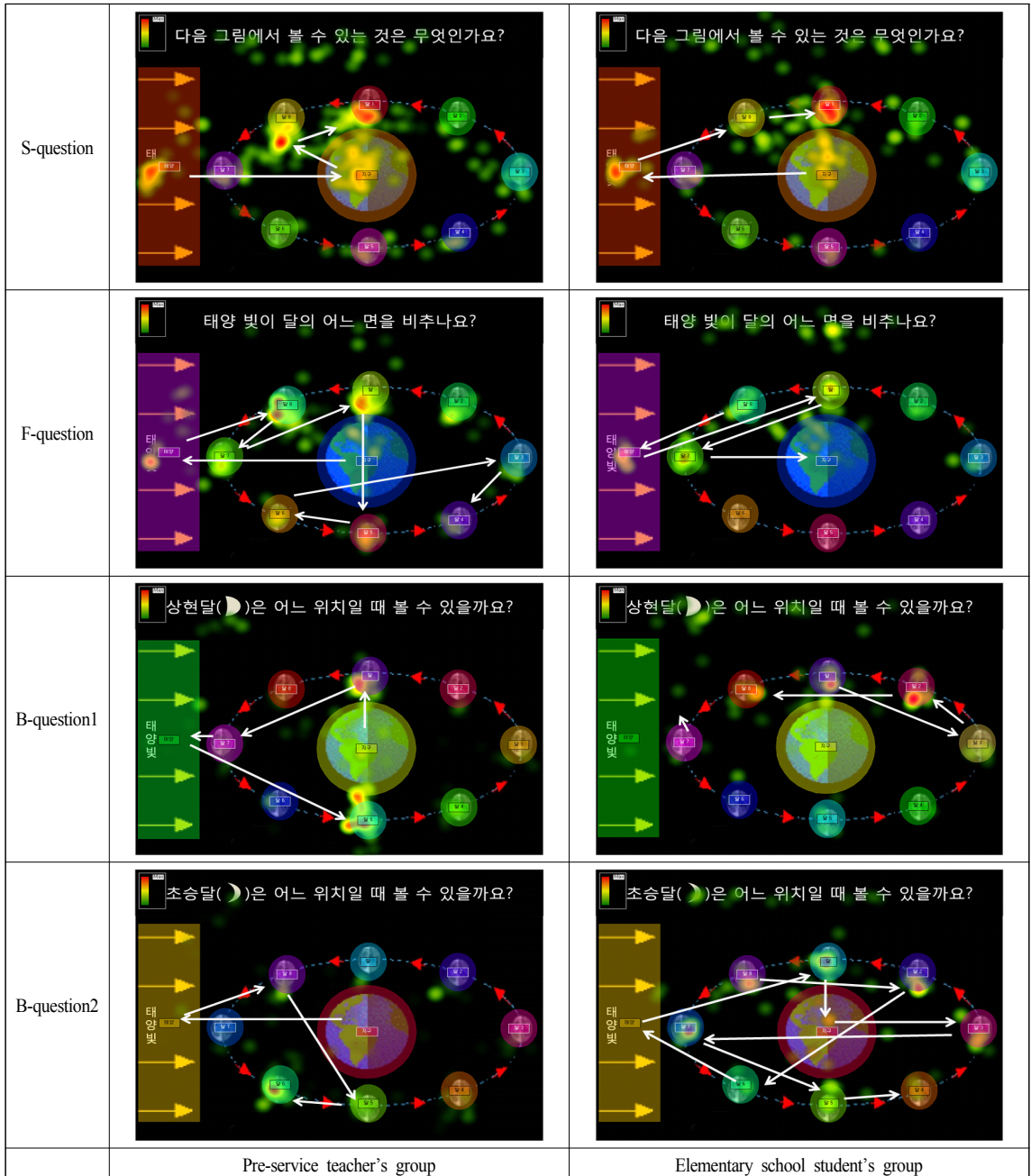


Fig. 8. Differences between pre-service teacher and elementary school student's eye-fixation about the each questions

하고 있는 것을 확인할 수 있다. 마지막으로 작용에 관한 질문 2에 대해 0~5초 동안 첫 번째 시선이 고정된 곳은 예비교사의 경우 지구, 태양, 달5, 달6 순으로 나타났으며, 초등학생은 달8, 달2, 달6, 태양, 달1, 지구, 달3, 달7, 달5, 달4 순으로 나타냈다. 작용에 관한 질문 1의 경우와 비슷한 양상으로 예비교사는 5초 동안 지구, 태양, 달을 차례로 확인하면서 달6(초승달)으로 시선이 이동한 반면, 초등학생은 5초 동안 어떠한 영역을 응시하기보다 어떠한 경향성 없이 빠르게 도약하고 있는 것으로 확인되었다.

이상과 같은 결과를 통해 달 위상 변화 시각화 자료에 대하여 예비교사는 질문에 따라 지구의 관점에서 달과 태양과의 위치 관계를 차례로 확인하며, 시각화 자료를 이해하고 있음을 알 수 있었다. 하지만 초등학생은 시각화 자료에서 전체적인 구조와 기능을 확인하는 것을 간과하였으며, 작용에 관한 질문에 대해 정확한 달 위상을 확인하지 못하고, 시선이 질문과 관계없이 도약하고 있음을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 학생이 달 위상 변화 원인에 대해 태양, 지구, 달의 관계를 내적으로 시각화하지 못하고, 언어적 설명으로 저장하고 있기 때문으로 보인다.

IV. 결론 및 제언

이 연구에서는 달 위상 변화 원인의 시각화 자료에 대한 내적 시각화의 증거로 구조, 작용, 기능의 외적 지식 표상에 따른 질문을 통해 예비교사와 초등학생의 시선 이동을 분석하여 그 차이를 살펴보았다. 지금까지의 연구결과를 정리해 보면, 다음과 같은 몇 가지 차이를 보이고 있었다.

첫째, 시각화 자료에 대한 구조에 관한 질문에서 예비교사와 초등학생은 태양과 지구, 달 관심영역을 응시하는데 차이를 보이지 않았으나, 기능에 관한 질문과 작용에 관한 질문에서 관심 영역의 응시 시간에 유의미한 차이를 나타내었다. 예비교사는 시각화 자료에서 전체 달의 기능을 고루 응시하고, 작용에 관한 질문에 해당되는 달의 위치에 시선이 오랫동안 고정하였다. 반면, 초등학생은 상단에 위치한 달의 기능을 확인하는데 제한되었으며, 작용에 관한 질문과 관계없이 시선이 분산되어 나타났다. 또한 초등학생들은 주로 지구의 입장에서 윗부분을 응시하고 있었으며, 지구의 입장에서 시각화

자료의 하단 부분의 달을 응시하는 시간의 비율이 낮게 나타났다. 이와 같은 결과를 통해 예비교사는 지구를 중심으로 태양과 달과의 관계를 공간적으로 시각화하여 달 위상 변화의 메커니즘을 떠올리고 이를 확인하고 있는데 반하여, 초등학생은 시각화 자료를 보고도 달의 위상 변화 원인에 대한 심상을 떠올리지 못하고 있음을 알 수 있다. 이는 구조-작용-기능 틀에 대한 선행연구에서 전문가들이 구조, 작용, 기능의 관점에서 이해하는 반면, 초심자들은 주로 구조적인 측면에 중점을 두어 이해하며, 인과적 작용에 대해 이해가 부족하다는 연구결과와 일치한다(Hmelo-Silver & Pfeffer, 2004; Hmelo-Silver *et al.*, 2007). 즉, 초등학생들은 달 위상 변화 원인을 언어적 설명으로 저장하고 있었으며, 시각화 자료를 보고 작용에 관한 질문에 따른 위상을 찾기 어려워 하였다.

둘째, 예비교사와 초등학생의 달 위상 변화 시각화 자료에 대한 시선 이동 차이를 분석한 결과, 예비교사는 지구를 중심으로 태양과 달을 순차적으로 응시하여 작용에 관한 질문에 해당되는 달을 확인하였으나, 초등학생은 작용에 관한 질문에서 어떠한 영역을 응시하기보다 어떠한 경향성 없이 빠르게 도약하고 있는 것으로 확인되었다. 즉, 예비교사는 태양과 지구, 달의 구조와 기능을 확인한 후, 달의 위상을 내적으로 시각화하고 있었지만, 초등학생은 태양과 달, 지구의 관계를 확인하는 모습이 나타나지 않았다. 이와 같은 결과를 통해 예비교사는 지구를 중심으로 달 위상 변화 모델을 공간 시각화하여 달 위상 변화의 메커니즘을 떠올리고, 이를 확인하고 있는데 반하여, 초등학생은 시각화 자료를 통해 지구 중심의 입장에서 시각화 자료를 효과적으로 공간 시각화 하지 못하고 있음을 알 수 있다. 따라서 초등학생의 이해를 돕기 위해서는 교과서에 제시된 달 위상 변화의 시각화 자료가 기능적, 작용적 목적에 맞게 보다 명확하게 제시되어야 할 것이다.

이상의 연구를 통해 초등학생들이 달의 위상 변화를 학습한 후에도 달의 위상 변화에 대한 적절한 내적 시각화를 표상하지 못하고 있음을 알 수 있었다. 이처럼 달 위상 변화 원인에 대한 이해는 공간적 움직임과 위치 관계가 포함된 높은 수준의 추론을 요구하는 내용으로(Rivet *et al.*, 2012), 이 연구에서 초등학생들에게 외적 시각화 자료를 통해 기능과 작용 수준의 내적 시각화를 하는 것이 어려운

부분임을 확인하였다. 이와 같은 점에서 초등학생들에게 사용되는 시각화 자료는 개념의 이해를 돕기 위해 다양한 관점에서 시각화 자료 제시에 대한 공간적 전략이 반영되어야 할 것이다. Barnea(2000)는 공간 능력과 시각화 능력을 분석하기 위해 공간적 시각화, 공간적 적응, 공간적 관계를 분석하였다. 공간적 시각화는 이차원적 표현을 3원적 물체로 이해할 수 있는 능력을 이야기하며, 공간적 적응은 다른 관점으로부터 어떻게 표현되어 보여질 것인지를 상상할 수 있는 능력을 이야기한다. 마지막으로 공간적 관계는 머릿속으로 물체를 회전, 반사, 전환하며 조작하였을 때 나타나는 결과를 시각화할 수 있는 능력을 이야기한다. 또한 시각화 자료에 대한 공간변환(spatial transformation)은 과학교육에서 시각화 학습을 돕기 위한 효과적인 방법이 될 수 있으며(Ramadas, 2009; Trafton *et al.*, 2005), 학생들의 이해를 돕기 위해 교과서에 제시되는 시각화 자료가 기능적, 작용적 목적에 맞게 보다 명확하게 제시되어야 함을 시사한다.

참고문헌

- Abell, S., Martini, M. & George, M. (2001). That's what scientists have to do: Preservice elementary teachers' conceptions of the nature of science during a moon investigation. *International Journal of Science Education*, 23(11), 1095-1109.
- Barnea, N. & Dori, Y. J. (2000). Computerized molecular modeling the new technology for enhancing model perception among chemistry educators and learners. *Chemistry Education: Research and Practice in Europe*, 1(1), 109-120.
- Byeon, J. H., Lee, I. S. & Kwon, Y. J. (2011). A study on consulting of teaching behavior patterns of gaze fixation by using eye tracker: The case study. *Journal of Learner-Centered Curriculum and Instruction*, 11(4), 173-199.
- Choi, H. D. & Shin, D. H. (2012). Eye-tracking on in-service elementary teachers' interpreting of science textbook tables. *Journal of Korean Elementary Science Education*, 31(3), 358-371.
- Gabbard, C. (2012). The role of mental simulation in embodied cognition. *Early Child Development and Care*, 183(5), 643-650.
- Gilbert, J. K. (2005). Visualization: A metacognitive skill in science and science education. In *Visualization in science education* (pp. 9-27). Springer Netherlands.
- Glenberg, A. M. (2009). Prediction and emotion in dialog. *European Journal of Social Psychology*, 39, 1169-1172.
- Glenstrup, A. J. & Engell-Nielsen, T. (1995). Eye controlled media: Present and future state. B. S. Dissertation, Copenhagen University.
- Goel, A. K., Gomez de Silva Garza, A., Grué, N., Murdock, J. W., Recker, M. & Govindaraj, T. (1996). "Towards designing learning environments-I: Exploring how devices work," In Proc. Third International Conference on Intelligent Tutoring Systems: Lecture notes in computer science 1086, Springer.
- Hegarty, M. (2004). Diagrams in the mind and in the world: Relations between internal and external visualizations. In A. Blackwell et al. (Eds.) *Diagrams 2004 Conference Proceedings*. LNAI 2980 (pp. 1-13). Berlin and Heidelberg: Springer-Verlag.
- Hegarty, M., Kriz, S. & Cate, C. (2003). The roles of mental animations and external animations in understanding mechanical systems. *Cognition & Instruction*, 21(4), 325-360.
- Hmelo-Silver, C. & Pfeffer, M. (2004) Comparing expert and novice understanding of a complex systems from the perspectives of structures, behaviors and functions. *Cognitive Science*, 28(1), 127-138.
- Hmelo-Silver, C. E., Marathe, S. & Liu, L. (2007). Fish swim, rocks sit, and lungs breathe: Expert-novice understanding of complex systems. *The Journal of the Learning Sciences*, 16(3), 307-331.
- Hmelo-Silver, C., Holton, D. & Kolodner, J. (2000). Designing to learn about complex systems. *Journal of the Learning Sciences*, 9(3), 247-298.
- Johnson-Laird, P. N. (1980). Mental models in cognitive science. *Cognitive Science*, 4(1), 71-115.
- Kastens, K. A. & Rivet, A. (2008). Multiple modes of inquiry in earth science. *Science Teacher*, 75(1), 26-31.
- Katz, R., Ragnarsson, R. & Bodenschatz, E. (2005). Tectonic microplates in a wax model of sea-floor spreading. *New Journal of Physics*, 7, (37), doi:10.1088/1367-2630/7/1/037
- Kosslyn, M. S. (1994). *Image and brain: The resolution of imagery debate*. MIT Press.
- Lightman, A. & Sadler, P. M. (1993). Teacher predictions versus actual student gains. *The Physics Teacher*, 31(3), 162.
- Liu, L. & Hmelo Silver, C. E. (2009). Promoting complex systems learning through the use of conceptual representations in hypermedia. *Journal of Research in*

- Science Teaching*, 46(9), 1023-1040.
- Mason, L., Caterina, M. T. & Pluchino, P. (2013). Do fourth graders integrate text and picture in processing and learning from an illustrated science text? Evidence from eye-movement patterns. *Journal of Computers & Education*, 60, 95-109.
- McConkie, G. W., Underwood, N. R., Zola, D. & Wolverton, G. S. (1985) Some temporal characteristics of processing during reading. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 11(2), 168-186.
- Moulton, S. T. & Kosslyn, S. M. (2009). Imagining predictions: Mental imagery as mental emulation. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 364(1521), 1273-1280.
- Orion, N., BenChaim, D. & Kali, Y. (1997). Relationship between earth-science education and spatial visualization. *Journal of Geoscience Education*, 45(1), 129-132.
- Ramadas, J. (2009). Visual and spatial modes in science learning. *International Journal of Science Education*, 31(3), 301-318.
- Rivet, A. E. & Kastens, A. K. (2012). Developing a construct-based assessment to examine students' analogical reasoning around physical models in earth science. *Journal of Research in Science Teaching*, 49(6), 713-744.
- Robert, H. T., John, F. L. & Frederick, J. B. (2006). An exploration of the use of eye-gaze tracking to study problem-solving on standardized science assessment. *International Journal of Research & Method in Education*, 29(2), 185-208.
- Rommelse, N. N. J., Stigchel, S. V. & Sergeant, J. A. (2008). A review on eye movement studies in childhood and adolescent psychiatry. *Brain and Cognition*, 68(3), 391-414.
- Salvucci, D. D. & Goldberg, J. H. (2000). Identifying fixations and saccades in eye-tracking protocols. *Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research & Applications*, 71-78.
- Shin, W. S. & Shin, D. H. (2013). Analysis of eye movement by the science achievement level of the elementary students on observation test. *Journal of Korean Elementary Science Education*, 32(2), 185-197.
- Slykhuis, D. A., Wiebe, E. N. & Annetta, L. A. (2005). Eye-tracking students' attention to powerpoint photographs in science education. *Journal Science Education and Technology*, 14(6), 509-520.
- Subramaniam, K. & Padalkar, S. (2009). Visualisation and reasoning in explaining the phases of the moon. *International Journal of Science Education*, 31(3), 395-417.
- Trafton, J. G., Trickett, S. B. & Mintz, F. (2005). Connecting internal and external representations: Spatial transformations of scientific visualizations. *Foundations of Science*, 10(1), 89-106.
- Uttal, D. H. & O'Doherty, K. (2008). Comprehending and learning from 'visualizations': A developmental perspective. In J. K. Gilbert, M. Reiner & M. Nakhlel (Ed.), *Visualization: Theory and practice in science education* (pp. 53-72). New York: Springer.
- Zeilik, M. & Bisard, W. (2000). Conceptual change in introductory-level astronomy courses. *Journal of College Science Teaching*, 29(4), 229-232.