Jour. Korean Earth Science Society, v. 33, no. 2, p. 170–182, April 2012
http://dx.doi.org/10.5467/JKESS.2012.33.2.170

행성운동법칙에 관한 케플러의 귀추적 사고를 도입한 학습자료의 개발 및 적용

박 수 경*

경남대학교 과학교육과, 631-701, 경상남도 창원시 마산합포구 월영북16길 11

Development and Application of Learning Materials for the Law of Planetary Motion using the Kepler's Abductive Reasoning

Su-Gyeong Park*

Department of Science Education, Kyungnam University, Gyeongnam 631-701, Korea

Abstract: The purpose of this study was to develop learning materials based on the Kepler's abductive reasoning and to identify high school students' rule-inferring strategies on the law of planetary motion. The learning materials including the concepts of solar magnetic field, conservation of figure skater's angular momentum and Kepler's polyhedral theory were developed and the questions about Kepler's 2nd and 3rd law of planetary motion were also created. The participants were 79science high school students and 83general high school students. The patterns and properties of their abductive inference were analyzed. The findings revealed that the students showed 'incomplete analogy abduction', 'analogy abduction' and 'reconstruction' to generate the hypotheses concerning the Mars' motion related to the solar magnetic field. There were more general high school students who showed the incomplete analogy abduction than science high school students. On the other hand, there were more science high school students who showed the analogy abduction and reconstruction strategy than general high school students. Also, they showed 'incomplete analogy abduction', 'analogy abduction' and 'model construction and manipulation' to generate the hypotheses concerning Kepler's second law. A number of general high school students showed the incomplete analogy. It is suggested that because the analogy of figure skater cause the students' alternative framework to use, more detailed demonstration is necessary in class. In addition, students combined Kepler's polyhedral theory with their prior knowledge to infer Kepler's third law.

Keywords: law of planetary motion, Kepler's abductive reasoning, abductive inference, analogy abduction

요 약: 본 연구의 목적은 행성운동 법칙에 관한 케플러의 귀추적 사고를 도입한 학습자료를 개발하고 이를 고등학교 수업에 적용하여 학생들의 귀추적 추론을 밝히고자 하는 것이다. 이를 위하여 태양의 자기장, 피겨 스케이터의 각운동량 보존, 케플러의 정다면체 이론을 포함한 제시문과 과제문항을 개발하였다. 본 연구의 대상은 과학고등학교 학생 79명과 일반계 고등학교 학생 83명이었고 과제문항에 대한 응답을 비교・분석하여 학생들의 추론 전략 유형과 특성을 논의하였다. 본 연구의 결과, 학생들은 태양의 자기장에 대한 케플러의 생각을 근거로 화성의 운동에 대하여 불완전 유비귀추, 유비귀추, 자료의 재구성 전략을 사용하여 추론하였다. 케플러 제2법칙에 대한 귀추적 추론에서는 불완전 유비귀추, 유비귀추, 모델 구성 및 조작 귀추 등이 나타났다. 이와 관련하여 피겨 스케이터 유비 자체가 학습자들에게 대안개념을 유발할 수 있으므로 실제 수업에서 좀 더 구체적인 설명이 요구됨을 알 수 있었다. 또한 케플러 제3법칙에 대해서는 특히 정다면체 개념과 기존의 알고 있는 지식을 통합하는 개념적 결합 전략을 사용하여 추론한 경우도 나타났다. 적절한 유비귀추를 보여준 과학고 학생의 비율이 일반고 학생보다 여러 과제에서 더 높게 나타난 반면 일반고 학생은 과학고 학생에 비하여 불완전 유비귀추를 더 많이 보여주었다. 본 연구는 케플러의 귀추적 사고를 모델링하여 가설을 형성하는 과정에서 발휘되는 귀추전략을 밝힘으로써 이와 관련한 수업에서 구체적인 방안을 찾는데 근거 자료가 될 것이다.

주요어: 행성운동 법칙, 케플러의 귀추적 사고, 귀추적 추론, 유비귀추

*Corresponding author: psookyong@naver.com
Tel: +82-51-290-6817
Fax: +82-51-290-6813

서 론

가설을 형성하는 사고과정은 과학분야 문제해결의 중요한 부분이며 하나의 가설은 연구자에 의해 많은 작업을 거쳐 받아들여지거나 버려지게 된다. 가설이 생성되는 과정에 대한 견해 중에서 가장 지지를 받는 것은 귀추적 추론의 과정으로 Peirce (1955)와 Hanson (1958)은 가설형성이 귀추(abduction)라는 논리적 사고 과정을 거치게 된다고 주장하였다. 이들에 의하면 귀추란 관찰된 현상에 대한 설명을 창조하는 과정으로, 새로운 개념을 설명하기 위하여 기존의 현상들을 빌려서 적용하는 방법을 말한다.

Hanson (1961)은 케플러가 화성의 궤도가 타원이라는 가설로부터 시작하여 관측한 사실들을 연역한 것이 아니라고 지적한다. 오히려 케플러는 행성에 대한 관측 자료로부터 거슬러 올라가서 타원궤도의 가설에 이르게 된 것이다. 하지만 이러한 견해는 관측 자료를 귀납적으로 종합한 결과로 보는 경험론적 전통과는 구별된다. 그에 따르면 과학적 법칙이 자료들의 단순한 요약이라는 귀납적 관점은 잘못된 것이다. 물론 여기서 가설-연역적 방법 자체가 부정되는 것은 아니다. 오히려, 귀추적 방법에 의해 제안된 가설들은 가설-연역적 방법과 실험적인 방법 등에 의해 더욱 탐구됨으로써 과학적인 법칙으로 정당화될 수 있다. 가설-연역론자들이 옳지 못한 점은 그들의 사고의 출발점인 가설이 어떻게 고안되었는가에 대해서 침묵하고 있다는 점이다. 이에 반하여 귀추법은 놀랄만한 현상에서 출발하여 새로운 규칙을 형성하고 그 규칙을 다음 단계의 과학적 탐구의 대상으로 제안하는 추론 방법이라고 할 수 있다(Lawson, 2000).

한편, 케플러는 태양이 행성들을 궤도에서 움직이게 하는 원인과 관계가 있을 것으로 생각하였고 그의 이러한 귀추는 모든 업적 중에서도 가장 중요하다고 볼 수 있다(Hanson, 1958). 원형 궤도에 근거한 계산 결과들이 티코 브라헤의 관찰 결과와 일치하지 않게 되자 비로소 그는 체계적으로 원형 궤도 가설을 의심하기 시작하였다. 케플러는 화성의 궤도가 원형이 아닐 수도 있다는 관점을 지지하기 위해 한 가지 잠정적인 가설을 설정하여 이를 조심스럽게 논의하였다. 케플러는 근일점에서만 원과 일치하는 비원형 곡선을 가정하였다. 이것이 달걀형(figuram ovalem) 궤도로, 그 당시에 케플러 역시 행성의 궤도가 원형이라는 생각을 완전히 버리지 못하였기 때문에 제시한 것으로 보인다. 특히 케플러의 처음 생각한 비원형 곡선은 타원이 아니었다는 점에 주목할 필요가 있다. 달걀형은 괴상한 기하 형태로 관측치와 맞지 않았고 두 개의 초점을 가질 수 없으며 기하학적으로도 다루기가 매우 어려웠다(Szpiro, 2003). 따라서 다음 단계로 추론한 것이 타원궤도이며 이는 다른 행성들에도 적용될 것으로 예측되었고 행성운동의 법칙으로 정리되었던 것이다(김영민, 2010). 이런 과정에서 케플러는 행성들의 궤도를 정확하게 기술하는 것뿐만 아니라 “행성들을 움직이게 하는 원인은 무엇인가?”라는 물음에 답하고자 하였다. 이 물음에 대해 케플러는 행성들을 운행하게 하는 “어떤힘”이 태양에서 기원하고 그것은 마치 자기력과 같은 것이라고 설명하였다. 즉 행성들은 태양으로부터 방사되는 자기장 속을 운행하는데 행성이 태양의 자기력에 반발하는 방향으로 될 경우 태양으로부터 멀어지고 태양의 자기력에 끌리는 방향으로 배열될 경우 태양에 가까워지게 된다고 설명하였다. 서로 멀리 떨어져 있는 물체 사이에서 작용할 수 있는 자기력이라는 잘 알려진 규칙을 이용하여 행성운동의 원인을 설명한 케플러의 사고 방법은 “유비 귀추”의 좋은 예가 될 수 있다(Snyder, 1997).

이외에도 추론 전략에는 자료의 재구성(reconstruction), 개념적 결합(conceptual combination), 모델 구성 및 조작(model construction and manipulation) 등이 있다(Thagard, 1992; Magnani, 2001; 오필석과 김찬종, 2005). ‘자료의 재구성 전략’은 과학자들이 탐구 문제를 해결하기 위해 필요하다고 이미 알고 있거나 염두에 두고 있는 규칙들을 쉽게 추리해 낼 수 있도록 정보를 재배열하거나 증거를 선별하는 전략이다. ‘개념적 결합’은 현상을 설명하기 위해 새로운 규칙을 형성하는데 있어 이미 알려진 개념들을 결합하는 전략이다. ‘모델 구성 및 조작’은 대상의 모습이나 움직임을 그림을 통해 표상하고 이를 통해 문제상황을 설명하는 전략으로 종종 모상모델(iconic model)의 특징을 지닌다. 모상모델은 “실재하거나 아니면 가상에 의한 것으로 다른 사물 및 과정과 비슷하고 또 우리의 이해를 진작시키는 기능을 하는 사물 내지 과정”을 말한다. 복잡한 현상을 설명하기 위하여 모델을 구성하고 이를 조작해 보이는 전략은 문장으로 이루어진 추리의 제한점을 넘어서 보다 창의적인 규칙의 형성을 가능하게 해준다.

귀추적 사고와 관련된 국내 선행연구로는 우선 귀

추법에 대한 이론적 고찰과 교육적 함의를 제시한 연구들(오필석과 김찬종, 2005; 김영민, 2006; 정용재와 송진웅, 2006), 과학자의 탐구과정에서 나타나는 귀추적 추론을 분석한 연구(조현준 외, 2008) 등이 있다. 지구과학 분야 주제와 관련하여 귀추적 사고를 밝힌 연구로는 지구환경적 문제 해결 과정에서 귀추적 추론 전략을 밝히거나(오필석, 2006), 귀추 추리 전략을 통한 과학영재를 위한 프로그램 개발(오준영 외, 2008), 야외 지질 학습에서 나타난 중학생들의 귀추적 추론(맹승호 외, 2007), 수증기 응결에 관한 초등학생들의 가설 생성(권용주 외, 2003) 등에 관한 연구들이 있다. 하지만 고등학교 지구과학 교과서 단원 주제와 관련하여 귀추적 사고를 다룬 연구는 아직 이루어지지 않고 있다.

이에 본 연구에서는 행성운동 법칙에 관한 케플러의 사고 과정을 도입한 학습자료를 개발하고 이를 적용하여 고등학생들의 귀추적 추론 과정을 조사하고자 하였다. 이를 위하여 케플러가 행성의 운동 법칙을 밝힐 때 거쳤던 귀추적 사고과정을 중심으로 재구성한 제시문과 과제 문항을 개발하였다. 개발된 자료를 과학고등학교 학생과 일반계 고등학교 학생을 대상으로 실시한 후 이들이 형성한 귀추 추론 전략의 유형과 특징을 비교・분석하였다. 본 연구의 결과는 귀추적 사고에 대한 이론적 논의를 현장 과학 수업에 어떻게 적용할지에 대한 구체적인 사례를 제시하고 향후 다양한 자료 개발을 위한 기초연구로서 의의가 있을 것이다.

연구 방법

연구대상

본 연구의 대상은 B광역시 과학고등학교 2학년 4학급 총 79명과 일반계 고등학교 1학년 2학급 총 83명이었다. 과학고등학교는 남학생 60명, 여학생 19명이었고 일반계 고등학교 남학생 42명, 여학생 41명으로 구성되어있다. 과학고등학교 학생들은 학교장 추천제와 각종대회 입상자를 포함하는 특별전형과 과학창의성 시험을 통해 선발된 학생들이다. 이들은 특수목적고등학교 교육과정 운영에 따라 1학년에서 2007년 개정교육과정의 지구과학을 이수하였고 연구를 위한 질문지를 실시하기 전 2학년 1학기에 지구과학 실험을 이수하였다. 일반계 고등학교 과학 교육과정에 의하면 2009년 개정교육과정의 융합형 과학 과목에서 케플러의 운동법칙이 다루어지고 있다. 따라서 본 연구에서는 새로운 교육과정을 이수하고 있는 일반계 고등학교 1학년 학생을 대상으로 하였다. 이들은 행성의 운동 단원의 수업을 마친 이후에 본 연구를 위한 과제에 응답하였다. 본 연구를 위한 질문에 응답할 것에 대하여 두 학교의 해당 학생들을 대상으로 동의여부를 조사하였고 전원 동의하에 제시문과 과제문항을 투입하였다.

용어의 정리

유비 귀추(analogy abduction)전략: 유비란 비슷한 상황에서 성공적으로 기능하였던 규칙들을 이용하여 현재 주어진 현상에 대한 새로운 설명을 제시하는 전략이다. 이 전략이 효과적으로 적용되기 위해서는 설명돼야 할 현상들과 설명적 진술들 사이의 일관성이 잘 확립되어야 한다.

자료의 재구성(reconstruction) 전략: 과학자들이 탐구문제를 해결하기 위해 필요하다고 이미 알고 있거나 염두에 두고 있는 규칙들을 재배열하거나 증거를 선별하는 전략이다. 예를 들어 지구의 역사를 엮는데 충분한 정보가 제공되지 않는 지구과학 탐구의 맥락에서는 주어진 현상들에 대해 모종의 조작을 취하게 되며(Kim, 2002), 어떤 사실이나 원리 법칙 등을 규칙으로 선택하는 과정은 수동적이라기보다 상호작용적이고 창조적인 과정이라고 할 수 있다.

개념적 결합(conceptual combination) 전략: 귀추적 추론 과정에서 이미 알려진 개념들을 결합함으로써 어떤 현상이 설명될 수 있으며 지구과학의 역사에서 베게너가 대륙이동설을 제안한 경우가 대표적인 사례이다. ‘하나의 대륙’이라는 개념과 미끄러져 움직이는 얼음덩어리의 모습에서 착안한 ‘수평이동’이라는 개념을 결합하여 ‘과거에 붙어있던 대륙들이 분리되어 수평적으로 이동하였다면 현재 떨어져 있는 대륙들의 해안선이 서로 잘 일치한다’는 새로운 규칙을 세운 것이다.

모델 구성 및 조작(model construction and manipulation) 전략: 관심있는 대상의 모습이나 움직임의 과정을 그림을 통해 표상하고 조작 설명하는 전략이다. 문제해결과정에서는 추론자들이 글로만 표현하는 한계를 보완하여 “실재하거나 아니면 가상에 의

한 것으로 다른 사물 및 과정과 여러 가지 점에서 비슷하고 또 우리의 이해를 진작시키는 기능을 하는 사물 내지 과정"을 말한다.

연구절차

학습과제는 관련 선행연구(Wilson, 1972; 김영민, 2006)와 참고문헌(김영식과 임경순, 2007; 이희정 역, 2005; 이필렬 역, 2005)에서 제시된 케플러의 행성탐구의 과정을 참조하여 "행성 운동의 비밀을 밝힌 케플러의 생각 따라잡기"라는 제목으로 제작하였다. 각 과제들은 기하학적인 방법에서 벗어나 물리학적으로 태양의 존재를 인식한 케플러의 사고에 착안하였다. 즉 코페르니쿠스 시기까지만 해도 수학이나 기하학의 방법으로 천체들의 운동을 기술하는 운동학의 수준에 머물렀던 천문학의 지위를 천체가 움직이는 물리적인 원인을 규명하려는 동역학의 위치로 끌어올린 것이 케플러의 업적이었다. 이러한 케플러의 귀추적 사고를 바탕으로 행성의 운동법칙에 대한 3가지 제시문과 과제문항을 개발하였다. 개발된 자료는 과학교육전공 교수와 석·박사과정의 대학원생 7명의 검토를 거쳐 천제물리적인 개념에 적합하도록 지문을 수정하였고 고등학생 수준에게 이해하기 쉬운 문항으로 완성하였다. 개발된 세 가지 학습자료 중 학습자료 1과 3은 케플러의 사고과정을 그대로 인용하여 구성하였고 학습자료 2는 피겨 스케이터 유비를 소재로 하면서 케플러의 사고를 간접적으로 반영하였다.

학습자료는 B광역시에 위치한 과학고등학교 2학년 4학급 79명과 일반계 고등학교 1학년 2학급 83명을 대상으로 적용하였다. 수업을 진행하기 전에 본 학습자료의 개발 의도와 개요에 대하여 두 학교의 담당 지구과학 교사들에게 안내하였다. 교사는 학생들이 60분에 걸쳐 자기주도적으로 학습하는 과정을 보조하는 역할로 과제의 제시문에 대한 질문과 응답요령에 대한 질문에 답하였다. 연구대상 학생들은 행성의 운동 단원의 수업을 마친 이후에 본 연구를 위한 학습과제에 응답하였다. 본 연구를 위한 질문에 응답할 것에 대하여 두 학교의 해당 학생들을 대상으로 동의여부를 조사하였고 전원 동의하에 제시문과 과제문항을 투입하였다.

자료분석

본 연구에서 개발된 과제문항에 대한 학생들의 응답을 분석하여 이들의 귀추 추론 전략을 비교·분석하였다. 연구자 외 2명의 지구과학 교사 등 3명이 평가자로서 학생들의 응답을 분석하였다. 먼저 전체 학생을 대상으로 검토 후 나타난 귀추의 유형을 분류하였고 각 응답을 구체적으로 분석하여 어느 범주에 해당하는지 빈도를 구하였다. 평가자 간의 신뢰도를 높이기 위하여 3명의 연구자들은 분석결과를 교차 확인하였고 토의를 통하여 일치도를 높였다. 본 연구에서 수집된 자료는 Microsoft Office Excel 2010 프로그램을 사용하여 입력·검수하였고, 귀추 유형별 해당 인원수와 백분율을 비교하였다.

연구의 제한점

일반적인 귀추는 새로운 상황 즉 놀랄만한 현상의 발견으로부터 출발하여 이를 설명하기 위한 가설을 만드는 일련의 과정에서 나타나는 추론 과정이다. 그러나 실제로 본 연구에서는 학생들이 수업을 통해서 배운 행성의 운동에 대한 선행지식을 가진다는 점에서 추론적 사고에 제한점으로 작용할 수 있다. 두 학교 모두 사전 수업에서 행성 운동법칙에 대한 자발적인 추론과정의 기회가 주어지지 않았고 설명식 수업 형태로 이루어졌다. 따라서 본 연구의 과제 해결 과정에서 자신들이 이미 알고 있는 관련 개념이 포함될 수는 있으나, 귀추적 사고를 새롭게 시도하도록 한 점에 의의가 있다.

그리고 본 연구의 대상이 과학고등학교 2학년과 일반계 고등학교 1학년 학생이었기에 학년의 차이에서 생기는 추론 능력의 차이를 통제하기 어려웠던 점이 연구의 제한점으로 작용할 수 있다.

연구 결과 및 논의

학습자료 개발 결과

가. 학습자료 1의 제시문과 과제

학습자료 1의 제시문은 다음과 같고 포함된 그림은 Fig. 1과 같다.

제시문 1: 케플러 이전까지 천문학자들은 하늘에 점이 있다고 가정하고 그 점을 중심으로 그린 편심원을 이용하였다. 당시 천문학자들은 여기에 의문을 품지 않고 아무것도 없는 점을 중심으로 행성의 운동을 가정하였다. 케플러는 이런 사고방식에 의문을 품고 행성은 아무것도 없는 '점' 주위를 돌 수 없기

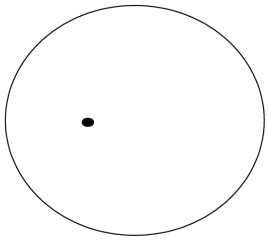


Fig. 1. Illustration of task 1.

때문에 행성들이 태양 주위를 돌아야 한다고 생각하였다. 케플러는 아직 전혀 알려지지 않은 태양의 역할을 알려면 이 생각을 반드시 계산에 적용해 봐야 한다고 생각하였다. 태양을 기준으로 삼는 것이 수학적으로는 전혀 도움이 되지 않지만 물리학적으로는 반드시 필요하기 때문이었다. 또한 그는 행성들을 운행하게 하는 모종의 힘이 태양으로부터 기원하고 그것은 자기력과 같은 것이라고 설명하였다. 즉 행성들은 태양으로부터 방사되는 자기장 속을 운행하게 되는데 거리가 가까울수록 자기력이 점점 강해지는 것처럼 화성이 가까이 다가올 때 더 '효과적으로' 힘을 미친다고 생각하였다.

과제 1: 위의 글에서 케플러의 생각을 바탕으로 화성의 운동속도에 대하여 가설을 세워봅시다.

나. 학습자료 2의 제시문과 과제

학습자료 2의 제시문은 다음과 같고 포함된 그림은 Fig. 2와 같다.

제시문 2: 뉴턴의 운동 법칙에 의하면 운동량은 보존된다. 운동량과 각운동량은 외부에서 힘이 작용하지 않는 한 물리적인 변화가 있기 전과 후가 항상 일정하다. 예를 들어 어떤 물체가 질량은 일정한데 회전을 하면서 점점 수축하고 있다면, 각운동량이 일정하게 유지되기 위해 회전 속도가 빨라지게 되는 것이다. 옆의 그림과 같이 스케이트 선수들이 팔을 활짝 펴고 회전하다가 팔을 움츠렸을 때 회전 속도가 더 빨라지는 것을 보았을 것이다. 피겨 스케이트 선수의 질량은 그대로인데 회전축으로부터의 거리가 짧아지면서 몸의 회전 속도가 빨라져서 각운동량이 보존되는 것이다. 운동량과 각운동량은 외부에서 힘이 작용하지 않는 한 물리적인 변화가 있기 전과 후가 항상 일정하다.

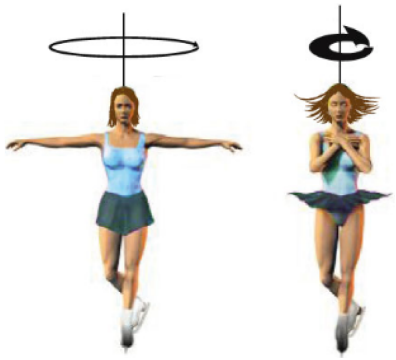


Fig. 2. Illustration of task 2.

과제 2-1: 위의 글과 관련지어 태양계 행성의 위치에 따라 운동속도가 어떻게 다른지 그림으로 그리고 가설을 세워봅시다.

과제 2-2: 이 때 태양이 스케이트 선수의 몸통이라고 생각할 때 행성의 운동과 스케이트 선수의 운동이 일치하지 않는 점에 대하여 설명하고, 두 가지 운동을 일치시키기 위하여 스케이트 선수를 변형시켜 봅시다(그림에 설명을 보충하여 표시할 것).

다. 학습자료 3의 제시문과 과제

학습자료 3은 케플러의 정다면체이론과 조화의 법칙을 연결하도록 하는 것으로 제시문은 다음과 같고 포함된 그림은 Fig. 3과 같다.

제시문 3: 케플러는 태양주위를 도는 행성이 더 많거나 적지 않고 여섯 개라는 사실이 우연이 아니라고 생각하였다(나머지 행성은 케플러 시대 이후에 발견됨). 또한 피타고라스가 그랬듯 케플러는 세계의 구조가 수학적인 성질을 띠고 있다고 확신하였다. 여러 가지 도형을 그려보던 케플러는 당시 가장 멀리 있다고 알려진 토성과 목성 궤도가 정삼각형을 이루는 것으로 작도하였고 그림과 같은 정다면체 이론을 생각해냈다. 이 이론에서 지구와 화성의 천구는 정십이면체에 각각 내접·외접하며 기하학적으로 연결되어있다. 이런 기하학적 구조는 틀린 것으로 밝혀졌지만 애초의 직감은 케플러의 머릿속에 고스란히 남아 있었고 이러한 직감에 따라 의문을 가지고 행성의 관측 기록을 조사하였다.

과제 3-1: 위의 글과 관련하여 케플러가 가진 의문에 대하여 자신의 가설을 세워 봅시다. 자신이 세운 가설

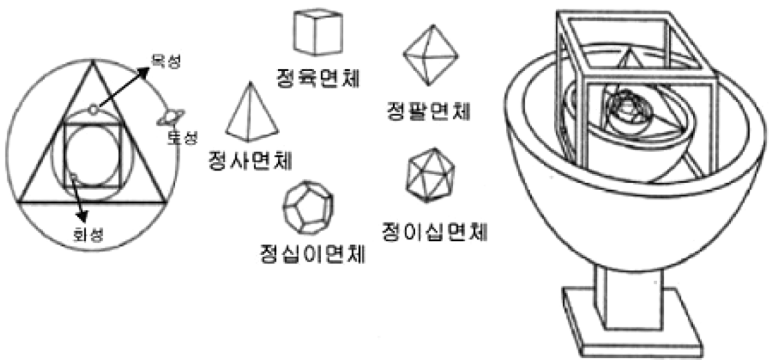


Fig. 3. Illustration of task 3 (Kepler's 3-dimensional polyhedral model of the solar system from Newton's apple 121 p.).

의 내용을 그래프 또는 그림과 함께 설명해봅시다.

과제 3-2: 과제3-1에서 세운 가설은 태양계가 아닌 다른 행성계 즉 하나의 항성과 여러 개의 행성으로 구성된 다른 체계에서도 성립할 것인지 가설을 세워 봅시다.

학습자료의 적용 결과

가. 화성의 운동에 대한 귀추전략 유형(학습자료 1)

학습자료 1의 제시문에서는 태양 자기장의 영향이 거리에 따라 달라지는 것처럼 화성이 태양에 가까울 때 더 효과적으로 힘을 받을 것이라는 생각을 소개하였다. 이러한 케플러의 아이디어를 바탕으로 화성의 궤도 운동에 대한 가설을 세우도록 한 결과, 학생들에게 나타난 귀추 전략의 유형별 비율과 실제 사례는 Table 1과 같다. 물론 학생들의 사고 과정은 케플러처럼 새롭고 놀라운 현상의 발견으로부터 출발하는 것은 아니지만 케플러의 귀추적 사고를 모델링하여 가설을 형성하는 과정에서 발휘되는 귀추전략의 유형별 차이를 살펴보는데 의의가 있다.

과학고 학생들과 일반고 학생들이 사용한 귀추 전략을 비교한 결과 불완전 유비귀추, 유비귀추, 자료의 재구성 등 세 가지 유형이 나타났다. 이 중 불완전 유비귀추는 과학고 학생들은 8.9%, 일반고 학생들은 37.3%로 나타났다. 유비귀추는 과학고 학생들은 59.4%, 일반고 학생들은 42.2%로 나타났고 자료의 재구성 전략은 각각 30.4, 12.0%로 나타났다.

불완전 유비귀추에 해당하는 학생들은 유비 귀추를 시도하였으나 화성의 속도까지는 추론하지 못하고 단순히 가까울수록 힘을 많이 받을 것이라는 가설을 세운 경우로 일반계 고등학교 학생들에게서 더 많이 나타났으며 이에 해당하는 학생들의 응답 사례는 아래와 같다.

- 케플러가 생각한 것처럼 태양에 가까워질수록 무언가의 힘을 많이 받게 될 것이다(강유○).
- 거리가 가까울수록 많은 영향을 줄 것인데 그 영향은 화성이 태양주위를 돌도록 해야 하므로 인력과 같은 힘 일 것이다. 그러므로 거리가 가까울수록 많은 힘을 받게 된다.
- 태양과 화성 사이에는 만유인력의 법칙이 작용한다. 가까이 있을 때 더 큰 영향을 미칠 것이다.

이에 비하여 거리가 가까울수록 힘을 많이 받으므로 속도가 빨라 질 것이라는 가설을 세운 학생들은 성공적인 유비귀추 전략을 보여주고 있다. 케플러의 생각을 바탕으로 제시문에서 자기력의 세기라는 개념을 가져와서 태양의 힘과 운동속도로 추론한 사례는 아래와 같다.

- 화성이 다가올 때 태양이 더 효과적으로 힘을 미치기 때문에 태양에 가까워지면 운동속도가 빨라지고 멀어지면 느려질 것이다.
- 태양의 거리가 가까울수록 자기력이 점점 강해지는 것처럼 화성이 가까이 다가올 때 더 효과적으로 힘을 미칠 것이므로 화성이 태양과 가장 가까운 곳에 왔을 때 더 빠르게 공전한다(김지○).
- 화성의 궤도는 폐곡선을 이루고 있다. 그러면 궤도 내 한 점에 태양이 존재할 것이라고 예측할 수 있을 것이다. 화성의 위치가 태양에 가까워짐에 따라 인력은 강해지며 그 순간에서의 $mv^2/r=$ 인력관계에서 속도가 빨라진다.

Table 1. Types of abduction of Mars' motion (task 1)

Type of abduction	Examples of statement	The number of science high school students (%)	The number of general high school students (%)
incomplete analogy abduction	• Mars gets more force when it is closer to the Sun.	7(8.9)	31(37.3)
analogy abduction	• Mars moves more quickly because it gets more force when it is closer to the Sun.	47(59.4)	35(42.2)
reconstruction	• If Mars doesn't move more quickly it will be sucked into the Sun. • Mars moves more quickly when it is closer to the Sun, based on the equation $F=mv^2/r$.	24(30.4)	10(12.0)
no answer		1(1.3)	7(8.5)
Total		79(100)	83(100)

Table 2. Types of abduction for task 2-1

Type of abduction	Examples of statement	The number of science high school students (%)	The number of general high school students (%)
incomplete analogy abduction	• Mars moves slowly because the Sun moves much more quickly when it is closer to the Sun.	0(0)	8(9.7)
analogy abduction (a)	• A planet moves fastest when it is closest to the sun and it moves slowest when it is furthest from the sun.	33(41.8)	59(71.1)
analogy abduction (b)	• A figure skater will extend her arms when she spins, it corresponds to a planet far from the Sun.	42(53.2)	9(10.8)
No answer		4(5.0)	7(8.4)
Total		79(100)	83(100)

위의 두 가지 귀추와 달리 자료의 재구성 귀추전략은 과학자들이 탐구 문제를 해결하기 위해 필요하다고 이미 알고 있거나 염두에 두고 있는 규칙들을 재배열하거나 증거를 선별하는 과정을 거친다. 본 연구에서는 화성의 궤도운동 속도에 대하여 비례의 개념이나 역학 공식을 도입한 경우는 자료의 재구성 전략으로 분류하였다. 아래의 사례는 일반고 학생의 응답으로 자료를 재구성하면서 부분적으로 대체적 개념 틀을 보여주는 사례에 해당한다.

- 화성 궤도 내부에는 태양이 중심역할을 하는데 화성과 태양간의 거리가 일정하다고 할 수 없다. 또한 그 거리와 궤도운동 속도 간에 관계가 있을 것이다(반비례). 그렇지 않으면 화성이 태양 쪽으로 빨려 들어가야 할 것이다.

이에 반하여 아래의 사례는 알고 있는 역학 규칙을 사용하여 자료를 재구성한 과학고 학생의 응답으로, 전체적으로 과학고 학생들에게서 이와 유사한 응답이 많았다.

- 화성은 위치를 모르는 한 점 태양주위를 돌게 될 것이고 태양과 화성이 가까워지면 인력이 커지고 회전속도가 커진다. 태양과 화성이 멀어지면 인력이 작아져서 회전속도가 작아진다($F=mv^2/r$)(유재○).

나. 케플러 제2법칙에 대한 귀추전략 유형(학습과제 2)

스케이터의 각운동량은 외부에서 힘이 작용하지 않는 한 물리적인 변화가 있기 전과 후가 항상 일정하다는 제시문을 제시하고 두 가지 과제문항을 제시하였다. 과제 2-1은 화성의 위치에 따라 운동속도가 어떻게 다른지 가설을 세우고 그 내용을 화성의 궤도와 태양의 위치를 표시하여 설명하도록 하였다. 그 결과 학생들이 형성한 귀추 전략의 유형과 응답자 비율은 Table 2와 같다.

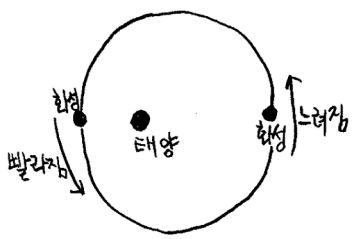
Table 2에 의하면 불완전 유비귀추는 과학고 학생들에게서는 나타나지 않았으며, 일반고 학생들에게서 전체인원의 9.7%로 나타났다. 운동량 보존 개념을 적용하여 유비귀추를 형성하였으나 비과학적인 개념을 형성한 불완전 유비귀추 사례는 다음과 같다.

- 중심축에서 거리가 짧아지면 그만큼 운동량을 보존하기 위해 많이 가야하기 때문에 느려질 것이다(강유○).
- 태양을 몸의 중심으로 보았을 때 화성은 팔이라면 태양에 가까워질수록 태양이 빨리 돌므로 화성의 속도는 느려진다.
- 태양과 가까워질 때에는 수축하기 때문에 태양에게 효과적으로 영향을 미치게 된다.

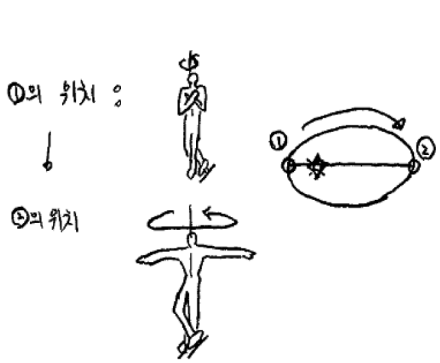
위와 같은 불완전 유비귀추와 달리 스케이터의 운동량 보존법칙을 바르게 적용하여 가설을 세운 경우가 유비귀추이다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 유비귀추a 유형에서는 단순히 각운동량이 보존되므로 가까운 위치에서 속도가 클 것이라고 추론한 경우로 과학고 학생은 41.8%, 일반고 학생은 71.7%로 나타났다. 유비귀추b 유형은 스케이트 선수가 팔을 펼칠 때와 움츠렸을 때를 구분하여 추론한 경우이다. 유비귀추b는 일반고 학생들에게서는 10.8%에 그쳤으나 과학고 학생들에게는 이 유형이 전체에서 가장 많은 53.2%로 나타났다. 유비귀추b의 경우, 설명돼야 할 현상과 진술들 사이의 일관성이 잘 확립된 경우로 볼 수 있으며 두 가지 유형의 유비귀추의 응답 사례는 아래와 같다.

- 각운동량은 거리와 속도에 비례하므로 거리가 가까워지면 속도가 빨라진다(유비귀추 type a)(김지○).
- 중심축에서 거리가 짧아지면 그 만큼의 운동량을 보존하기 위해 속도가 빨라질 것이다(유비귀추 type a).
- 스케이트 선수가 팔을 활짝 펴고 회전하는 것은 회전축에서 거리를 멀리하는 것이다. 따라서 회전축에서 멀어진 화성은 느려지고 가까워진 화성은 속도가 빨라진다(유비귀추 type b).
- 스케이트선수가 팔을 벌리고 회전하다 팔을 움츠렸을 때 회전하는 속도의 차이가 화성이 원일점에서 근일점으로 가는 것과 같을 것이다(유비귀추 type b)(유재○).

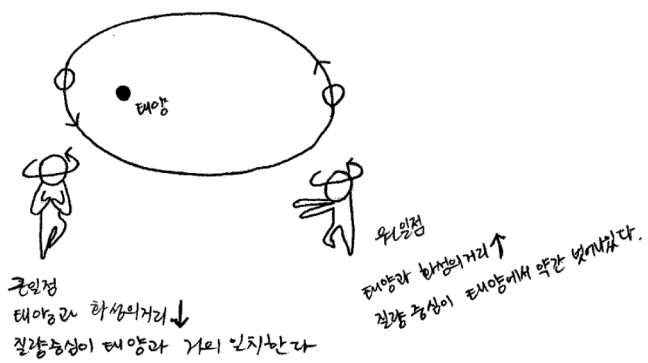
과제 2-2는 태양이 스케이트 선수의 몸통이라고 생각할 때 화성과 스케이트 선수의 일치하지 않는 점에 대하여 설명하고, 화성의 운동과 일치되도록 스케



type a



type b



type b

Fig. 4. Examples of analogy abduction for task 2-1.

Table 3. Types of abduction for task 2-2

Type of abduction	Examples of statement	The number of science high school students (%)	The number of general high school students (%)
incomplete analogy abduction	• length of the arms of a figure skater should be different because the distance between the Sun and Mars is different.	6(7.6)	42(50.6)
analogy abduction	• the space between the hands and body of a figure skater should not be filled with the matter.	34(43.0)	12(14.5)
model construction and manipulation	• the mass should be concentrated in the tip of arm.	31(39.3)	6(7.2)
no answer		8(10.1)	23(27.7)
Total		79(100)	83(100)

이트 선수의 형태를 변형하는 것이었다. 그 결과 나타난 학생들의 귀추적 사고 유형은 불완전 유비귀추, 유비귀추, 모델 구성 및 조작 등이었고 해당 유형의 응답자 비율은 Table 3과 같다.

Table 3에 의하면 불완전 유비귀추는 특히 일반고 학생들에게서 50.6%로 매우 높았으며 과학고 학생들은 7.6%로 비율이 낮아, 두 집단의 응답 경향이 매우 다르게 나타났다. 이는 화성과 스케이트 선수의 일치하지 않는 점을 설명하고 스케이트 선수의 형태를 변형하는 과제에서 과학고 학생들이 창의적인 사고 능력을 발휘한 것으로 해석된다. 즉, 많은 일반고 학생들의 경우 스케이트 선수의 팔 길이가 항상 같기 때문에 양팔의 길이를 다르게 해야 한다는 단순 논리를 제시하고 있다. 이러한 응답은 매우 유사하게 많은 학생들에서 나타났으며 Fig. 5에서 그 사례를 볼 수 있다. 이는 태양-화성 체계에 대한 스케이트 선수 유비 자체가 일반 학생들에게는 어렵게 인식되며 오개념을 유발할 수 있음을 보여주는 것이다. 과제를 이해하지 못하여 응답을 하지 않은 학생이 일반고에서는 27.7%에 달하였다. 이에 비하여 스케이트 선수의 팔이 물질로 채워져 있는 반면 태양과 화성 사이에는 물질이 없다는 점을 제대로 귀추한 학생은 과학고 43%, 일반고 14.5%로 나타났으며 그 사례는 아래와 같다.

- 스케이트 선수와 달리 연속체가 아니다. 반지름방향으로 두 개체가 물질로 연접해 있지 않다(김지○).
- 스케이트 선수의 팔을 자르고 팔과 몸통 사이에 원격력이 작동하면 행성처럼 운동할 것이다.

과제2-2에 대하여 일부 학생들은 유비귀추에서 한 단계 더 나아가 모델 구성 및 조작 단계의 귀추를 형성하였으며 과학고 학생의 39.3%가 이에 해당하는 응답을 하였으나 일반고 학생에서는 7.2%의 극히 소수 학생들만이 이에 해당하는 응답을 하였다. 모델구성 및 조작 귀추는 관심 있는 대상을 그림 등을 통해 표상하고 이를 통해 문제 상황을 설명하는 전략

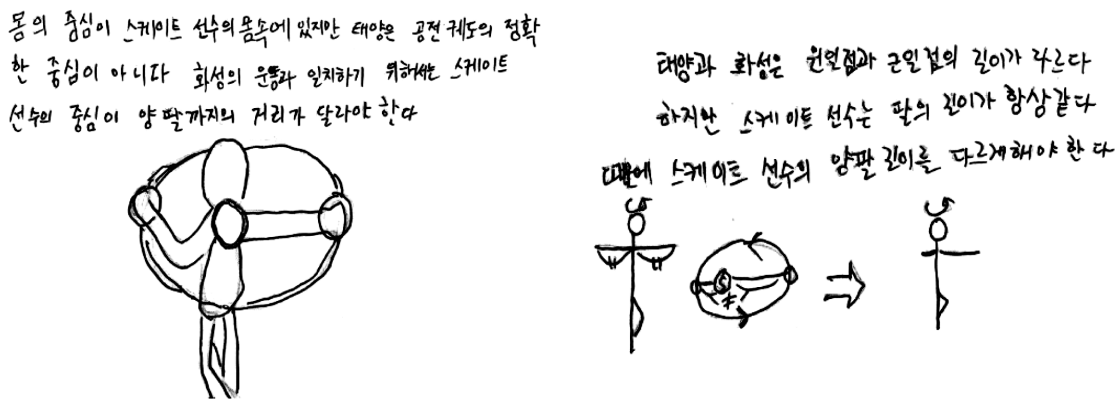


Fig. 5. Examples of uncompleted analogy abduction for task 2-2.

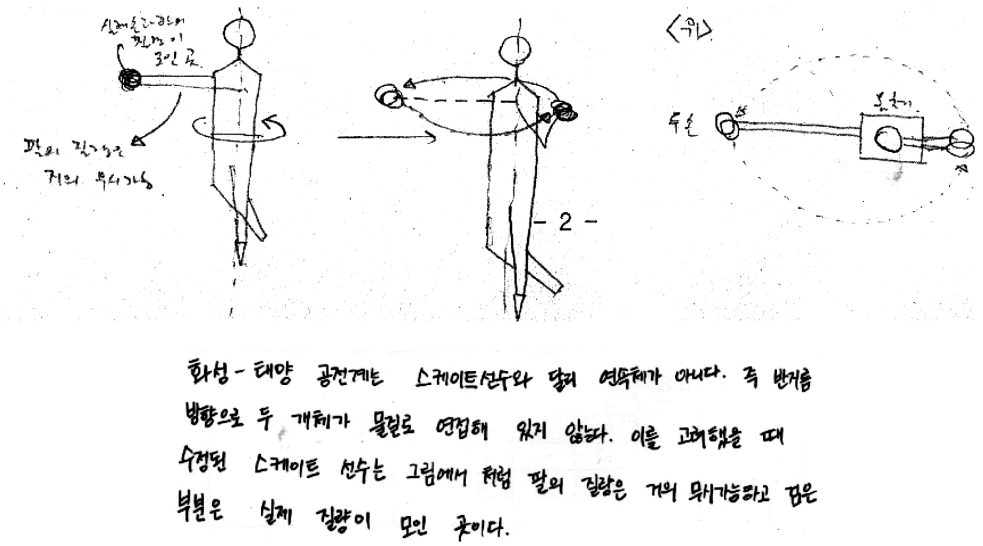


Fig. 6. Example of model construction and manipulation in task 2-2 (by Yu).

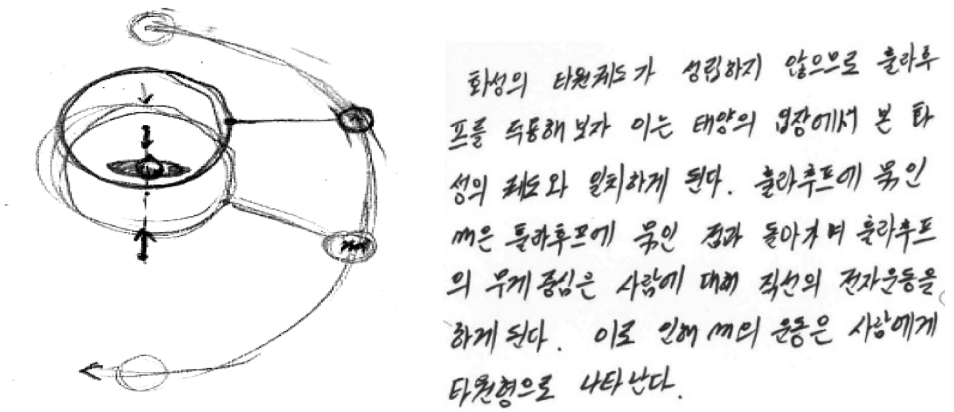


Fig. 7. Example of model construction and manipulation for task 2-2.

이며 이때 모형은 모상모델(iconic model)의 특징을 지닌다. 이러한 예에 해당하는 학생들의 응답을 Fig. 6과 Fig. 7의 그림과 설명에서 볼 수 있다. Fig. 6에서는 화성-태양 공전계에 맞도록 스케이트 선수를 변형하여 하나의 모델로 제시하고 있다. <위>로 표시하여 내려다본 본 모습으로 나타낸 그림에 의하면 불완전 유비귀추와 유사함을 알 수 있다.

또한 Fig. 7의 사례에서도 시각적인 모델을 구성하고 모델의 중요 요소들이 어떻게 기능하는가를 설명해 보임으로써 글로만 표현하는 한계를 보완하고 있다. 이는 복잡한 현상을 설명하기 위하여 보다 창의적인 사고를 보여주는 예라 할 수 있다.

다. 케플러 제3법칙에 대한 귀추전략 유형(학습과제 3)

과제 3은 케플러가 비록 과학적인 개념은 아니라고 밝혔지만 정다면체 이론을 바탕으로 관측 기록을 조사하였다는 제시문을 읽고 학생들이 자신의 가설을 세우도록 한 것이다. 그 결과 나타난 학생들의 응답을 분석한 결과 단순귀추, 유비귀추, 개념적 결합의 세 가지 귀추 활동이 이루어졌다(Table 4). 이 중 단순귀추는 과학고 학생들은 26.6%, 일반고 학생들은 34.9%로 나타났다. 유비귀추는 과학고 학생들은 39.2%, 일반고 학생들은 26.5%로 나타났고 개념적 결합은 각각 30.4, 20.5%로 나타났다.

Table 4. Types of abduction of task 3

Type of abduction	Examples of statement	The number of science high school students (%)	The number of general high school students (%)
simple abduction	• The distance between the regular polyhedrons is shorter as distance from the Sun increases	21(26.6)	29(34.9)
analogy abduction	• Kepler proposed that the distance relationships between the planets in terms of the regular polyhedrons.	31(39.2)	22(26.5)
conceptual combination	• The square of the period of the orbit (T^2) is proportional to the cube of the length of the semi-major axis (a^3).	24(30.4)	17(20.5)
no answer		3(3.8)	15(18.1)
Total		79(100)	83(100)

단순귀추는 케플러의 정다면체 이론에 한정하여 이를 차용하여 설명하는 경우로 일부 대안적인 개념도 포함되어있다. 단순귀추는 과학고 학생보다 일반고 학생들에게서 더 높은 비율로 나타났으며 이에 해당하는 학생들의 응답의 사례는 아래와 같다.

- 두 번째 도형은 처음보다 세 번째는 두 번째보다 반지름의 거리가 줄어들고 있으며 이것이 공전속도를 빠르게 하는 영향을 준다(강유○).
- 케플러는 화성의 궤도를 정다면체의 내접으로 해석했는데 이는 좀 문제가 있다고 본다. 정다면체의 모서리 꼭지점을 지나면서 회전하려고 할 때 상당한 무리가 있을 것으로 보인다. 내가 행성궤도를 가정했다면 여러 개의 타원을 겹쳤을 것이다.

Table 4에서 유비귀추에 해당하는 응답은 케플러의 정다면체 가설을 토대로 행성까지 거리가 멀어질수록 공전 주기가 길어짐을 연관 지어 가설을 세운 경우로 이에 해당하는 사례는 아래와 같다.

- 케플러의 그림을 토대로 하면 거리가 멀수록 궤도는 커지므로 한 바퀴 도는데 걸리는 시간이 오래 걸린다(김지○).
- 공전주기와 태양-행성 사이의 거리는 연관이 있다.
- 태양으로부터 거리가 멀수록 공전하는데 걸리는 시간이 오래 걸린다.

과제3의 응답에서 개념적 결합 전략을 사용한 것으로 분석되는 사례는 현상을 설명하기 위해 이미 알려진 개념들을 결합함으로써 이루어지는 경우(Thagard, 1992)로 정다면체 이론의 내용과 기존의 알고 있는 관련 개념을 동원하여 설명한 경우로 아래의 예들이 있다. 과학고 학생 중에는 케플러 제3법칙의 뉴턴형식을 유도하고 설명한 경우도 있었다.

- 일단 공전주기와 궤도 반지름이 서로 증가하는 관계를 보여야 한다. 직관적으로 $r \rightarrow \infty$이면 태양의 영향이 0에 가까워져 공전의 원동력이 없고 따라서 공전 주기가 ∞에 가까워져야 한다.
- 행성과의 거리와 속력이 반비례할 것이라고 가설을 세웠다. 그 가설을 토대로 하면 거리가 멀수록 궤도는 커지는데 속력이 줄어들게 되므로 한 바퀴 도는 데에 걸리는 시간이 오래 걸린다(유재○).
- 공전주기 T와 태양-행성 사이의 거리 r은 $\frac{r^3}{T^2}$=일정하다는 연관이 있다.
- $\frac{mv^2}{r} = mrw^2 = \frac{GMm}{r^2} = \frac{4\pi^2 mr}{T^2}$

  $\frac{r^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2}$

  $T = \sqrt{kr^3}$

  : 장반경(r)의 세제곱은 주기(T)의 제곱과 같다.

개별 학생들의 각 과제별 응답에 어떤 일관성이나 특성이 있는지 살펴보기 위하여 3명의 학생들(강유○, 김지○, 유재○)의 전체 응답을 분석한 결과는 다음과 같다. 우선 일반고 학생인 강유○ 학생은 화성의 속도까지는 추론하지 못하였고 비과학적인 개념을 포함한 불완전 유비귀추를 보여주었다. 그리고 과제3에서는 케플러의 정다면체 이론에 한정하여 설명하며 일부 대안 개념이 포함된 단순귀추를 하였다. 역시 일반고 학생인 김지○의 경우는 케플러의 생각을 바탕으로 태양의 힘과 운동속도를 성공적으로 추론하

였으나 스케이트 선수가 팔을 펼칠 때와 움츠렸을 때를 구분하여 추론하지는 못하였다. 과제 3에서 태양과 화성 사이에는 물질이 없다는 점을 제대로 추론하여 일반고 학생 중에서는 높은 성취를 보여준 사례였다.

한편, 과학고 학생인 유재○은 알고 있는 역학 규칙을 재구성하여 화성의 속도에 대하여 성공적으로 추론하였고, 모상모델과 개념적 결합 전략을 사용하여 전반적으로 성공적인 귀추과정을 보여주었다.

결론 및 제언

본 연구에서는 케플러가 행성의 운동 법칙을 밝힐 때 거쳤던 귀추적 사고과정을 기초로 자료를 개발하고 이와 관련하여 과제 문항을 제작하였다. 개발된 자료를 과학고등학교 학생과 일반계 고등학교 학생을 대상으로 실시하고 이들이 형성한 귀추 전략의 유형과 특징을 비교・분석하였다. 기존의 귀추 관련 연구에서 과학교과서 내의 주제를 활용한 적용 연구가 거의 없었으므로 본 연구에서는 교과서에서 배우는 주요 개념의 학습에서 학생들의 귀추 추론 활동을 도입한다는 측면에서 연구의 의의를 찾을 수 있다. 본 연구의 분석 결과에 대한 결론과 추후 연구를 위한 제언은 다음과 같다.

첫째, 관찰된 현상에 대한 설명을 창조하는 귀추 과정에서 학생들은 관련된 기존의 생각을 가지고 있더라도 이러한 기존의 생각이나 현상을 새로운 상황에 적용하는데 어려움을 느낀다. 관련개념을 가지고 있지만 이를 이끌어 내어 새로운 현상과 관련짓지 못하는 것이 대부분의 일반적인 학생들이 가지는 문제점이다. 따라서 과학자의 사고 과정을 자료로 제공하면 이러한 문제점에 대한 해결책이 될 수 있을 것이다. 이에 본 연구에서는 자기력의 세기변화라는 케플러의 아이디어를 제공하여 화성의 운동에 대한 가설을 세우도록 하였으며 그 결과 학생들이 유비귀추 전략을 활용하여 가설을 형성하였다. 여기서 과학학습능력이 높은 과학고 학생들은 유비귀추 전략을 성공적으로 활용한 학생들이 많은 반면에 일반고 학생들은 불완전한 유비귀추를 보여주었다. 이로써 태양의 힘과 행성의 운동속도에 대한 유비귀추를 하는데 있어 자기력의 세기 개념이 일반고 학생에게는 상대적으로 다소 어려운 것으로 밝혀졌다. 한편, 자료의 재구성 귀추는 과학자들이 탐구 문제를 해결하기 위해 필요하다고 이미 알고 있거나 염두에 두고 있는 규칙들을 재배열하거나 증거를 선별하는 과정을 거친다. 자료의 재구성 전략을 사용한 학습자들은 화성의 궤도운동 속도에 대하여 비례의 개념이나 알고 있는 역학 공식을 도입하여 추론하고 있음을 알 수 있었다.

둘째, 행성의 운동법칙에 대한 수업에서 많은 교사들이 흔히 사용하고 있는 비유 사례가 학생들이 관련 개념을 형성하는데 도움을 주기도 하지만 오히려 개념 이해에 있어 장애요인을 제공할 수도 있다. 이러한 사례의 대표적인 예로 케플러 제2법칙에 대한 피겨 스케이터 비유를 들 수 있다. 이에 본 연구에서는 스케이터를 예로 들어 각운동량 일정 법칙 개념을 자료로 제시하고, 이에 대한 학생들의 추론을 조사하였다. 그 결과 두 가지 유형의 유비 귀추가 형성되었으며 첫 번째 유형의 유비귀추에서는 단순히 각운동량이 보존되므로 가까운 위치에서 속도가 클 것이라고 추론한 경우이다. 두 번째 유형의 유비귀추는 피겨 스케이터가 팔을 펼칠 때와 움츠렸을 때를 구분하여 설명한 경우이다. 즉 스케이터가 팔을 펼친 경우는 화성이 원일점에 있을 때에 해당하므로 속도가 느리고, 팔을 움츠렸을 경우는 화성이 근일점에 있을 때에 해당하므로 속도가 빠르다고 바르게 추론한 것이다. 두 가지 유형의 유비귀추에 대한 학생들의 응답 비율을 살펴보면 첫 번째 유비귀추는 일반고 학생의 응답 비율이 과학고 학생보다 높은 반면에, 두 번째 유비귀추는 과학고 학생들의 응답비율이 일반고 학생들보다 월등히 높게 나타났다.

여기서 태양이 스케이터의 몸통이라고 생각할 때 화성과 스케이터의 일치하지 않는 점에 대하여 추론하고, 화성의 운동과 일치되도록 선수의 형태를 변형하도록 한 결과, 일반고 학생들에게서 지배적으로 나타난 응답이 양팔의 길이를 다르게 해야 화성과 스케이터가 일치할 것이라는 생각이었다. 이에 비하여 스케이터의 팔이 물질로 채워져 있는 반면 태양과 화성 사이에는 물질이 없다는 점을 제대로 귀추한 경우는 일반고 학생 중에는 극히 소수로 나타났다. 이는 태양-화성 체계에 대한 스케이터 비유 자체가 학습자들에게 오개념을 유발할 수 있으므로 실제 수업에서 이를 활용할 때 보다 구체적인 설명이 요구됨을 의미한다.

셋째, 케플러의 정다면체 이론과 관련한 과제에서 케플러가 가진 의문에 대하여 학생들 스스로 가설을 세우도록 한 결과, 나타난 단순귀추는 케플러의 정다

면체 이론에 한정하여 이를 차용하여 설명하는 경우로 일부 대안적인 개념도 포함되어있었다. 또한 개념적 결합 전략은 정다면체 이론의 내용과 기존의 알고 있는 관련 개념을 동원하여 케플러 제 3법칙을 추론한 경우이다.

본 연구에서 케플러 법칙에 대한 고등학생의 귀추 추론의 유형과 특징을 밝힌 결과는 이와 관련한 수업에서 구체적인 방안을 찾는데 근거 자료가 될 것이다. 본 연구의 논의와 관련하여 후속 연구에서는 지구과학의 다른 단원 수업에서 귀추 추론을 활성화시킬 수 있는 학습자료의 개발이 필요하며 이를 적용하고 구체적인 개선점을 찾는 연구가 이루어져야 할 것이다. 결론적으로 학습자의 귀추 추론활동에 대한 다각도의 방법론을 제안하고 이를 적용하는 연구가 추가적으로 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

권용주, 심해숙, 정진수, 박국태, 2003, 수증기 응결에 관한 초등학생들의 가설 생성에서 귀추의 역할과 과정. 한국지구과학회지, 24, 250-257.

김영민, 2006, Kepler의 망막상 이론 형성 과정에서의 과학적 문제발견과 귀추적 사고. 한국과학교육학회지, 25, 610-623.

김영민, 2010, 물리학 및 물리교육에서의 귀추적 사고 연구와 과학 창의성 교육. 새물리, 60, 689-701.

김영식, 임경순, 2007, 과학사 신론. 다산 출판사, 서울, 461 p.

맹승호, 박명숙, 이정아, 김찬종, 2007, 야외 지질 학습에서 나타난 중학생들의 귀추적 추론 사례 연구. 한국과학교육학회지, 27, 818-831.

오준영, 김상수, 강용희, 2008, 귀추 추리 전략을 통한 과학영재를 위한 창의적 교수학습 프로그램의 제안. 한국과학교육학회지, 28, 786-795.

오필석, 2006, 지구환경적 문제 해결 과정에서 귀추적 추론을 위한 규칙 추리 전략들. 한국과학교육학회지, 26, 546-558.

오필석, 김찬종, 2005, 지구과학의 한 탐구방법으로서 귀추법에 대한 이론적 고찰. 한국과학교육학회지, 25, 610-623.

장 마리 비구뢰, 이희정 역, 2005, 뉴턴의 사과. 누림book, 서울, 390 p.

정용재, 송진웅, 2006, Peirce의 귀추법에 관한 이론적 고찰을 통한 과학교육적 함의 탐색. 한국과학교육학회지, 26, 703-722.

조현준, 정선희, 양일호, 2008, 과학자의 과학적 탐구과정에서 나타나는 귀추적 추론 분석틀 개발. 한국지구과학회지, 29, 586-601.

찰스 길리스피, 이필렬 역, 2005, 객관성의 칼날. 새물결, 서울, 592 p.

Hanson, N.R., 1958, Patterns of discovery: An inquiry into the conceptual foundations of science. Cambridge University Press, London, UK, 242 p.

Hanson, N.R., 1961, Is there a logic of scientific discovery? Australasian Journal of Philosophy, 38, 20-35.

Kim, C.J., 2002, Inference frequently used in earth science. Journal of the Korean Earth Science Society, 23, 188-193.

Lawson, A.E., 2000, How do humans acquire knowledge? and What does that imply about the nature of knowledge? Science and Education, 9, 577-598.

Magnani, L., 2001, Abduction, reason, and science: Process of discovery and explanation. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, USA, 224 p.

Peirce, C.S., 1955, Abduction and induction. In Buchler (eds.), Philosophical writings of Peirce. Dover Publisher, New York, USA, 150 p.

Snyder, L.J., 1997, Discoverers' Induction. Philosophy of Science, 64, 580-604.

Szpiro, G.G., 2003, Kepler's conjecture. John Wiley and Sons, New York, USA, 299 p.

Thagard, P., 1992, Conceptual Revolution. Princeton University Press, NJ, USA, 304 p.

Wilson, C., 1972, How did Kepler discover his first two laws? Scientific American, 226, 93-106.

2012년 3월 9일 접수
2012년 4월 12일 수정원고 접수
2012년 4월 18일 채택