

잘 알려진 창의적 과학자들의 과학적 문제 발견 패턴 분석

김영민 · 서해애* · 박종석¹

부산대학교 · ¹경북대학교

An Analysis on Problem-Finding Patterns of Well-Known Creative Scientists

Kim, Youngmin · Seo, Hae-Ae* · Park, Jongseok¹

Pusan National University · ¹Kyungpook National University

Abstract: Nurturing students' scientific creativity is considered an important element in science education in Korea. The study aims to explore patterns displayed by well-known scientists in their quest for problem finding. Each case of scientists' course of problem solving is described in terms of historical background, a process of problem finding, and a process of problem solving. There are five patterns from ten scientists which are as follows: Pattern 1 is that scientists find problems from insufficiencies and/or errors from explanation of theories at the time and the related cases are A. Lavoisier, G. Mendel, and J. Watson. Pattern 2 shows that scientists find a problem because of strange phenomena unexplained by theories at the time, and here important case studies are E. Rutherford and W. Röntgen. Pattern 3 demonstrates that scientists find a problem from analogical reasoning between known theories and unknown science phenomena. The cases include S. Carnot and T. Young. Pattern 4 points to the fact that scientists find a problem while they utilize a newly invented experimental instrument. Here, G. Galilei is an important example. Pattern 5 establishes that scientists happen to find a problem while they conduct research projects. The works of M. Faraday and J. Kepler are prominent case studies related to this pattern.

Key words: problem finding, problem solving, patterns of problem finding, scientific creativity, science history

I. 서 론

과학 창의성의 계발은 과학과 교육과정의 중요한 목표의 하나이다(McCormack & Yager, 1989; MEST, 2011). 과학 창의성은 일반적으로 과학적 문제 해결의 한 형태로 설명할 수 있다(Lanley *et al.*, 1987). 과학적 문제 해결의 과정은 잘 정의된 문제에서부터 시작할 수 있지만, 대부분의 경우 문제 발견에서부터 시작된다. 정의된 문제를 창의적으로 해결하는 사람은 창의적으로 사고하는 사람이라고 할 수 있다. 그러나 누구든 간에 문제를 발견하지 못한다면, 누구도 창의적 재능을 발현할 수 없을 것이다. 즉, 누군가가 문제를 발견하게 될 때 비로소 창의적 문제 해결도 있을 수 있다.

그렇기 때문에 아인슈타인과 인펠트(Einstein & Infeld, 1938, p.92)는 “문제 발견은 종종 문제 해결

보다 더 본질적이다. 문제 해결은 대부분 수학적·실험적인 기능이지만, 문제 발견은 새로운 질문을 던지고 새로운 가능성을 제기하고, 새로운 관점에서 과거 문제를 고려하는 것으로 창의적인 상상력을 필요로 하며, 이러한 문제 발견이 과학 진보에 실질적으로 기여한다.”라고 말함으로써 문제 발견의 중요성을 역설하였다. 즉, 문제 발견은 문제 해결과 구분되고 문제 해결보다 더 중요하며, 문제를 발견하고 형성하는 과정은 창의적 사고의 핵심이라고 할 수 있다. 그러므로 폴라니(Polanyi, 1958, p.120)는 “문제를 아는 것 자체가 지식을 획득하는데 도움이 된다. 해결해야 하거나 해결할 가치가 있는 문제를 인지하는 것은 그 자체로 대단한 발견이다.”라고 주장하였는데 이는 설득력이 있다. 분명, 체계적으로 구체화된 문제는 지식의 소산이고, 문제는 더 많은 지식을 얻을 수 있는 동기이며, 문제 그 자체가 지식이 되기도 한다(Henle, 1971).

*교신저자: 서해애 (haseo@pusan.ac.kr)

**2013.07.21(접수), 2013.08.28(1심통과), 2013.12.07(2심통과), 2013.12.10(최종통과)

***이 논문은 2009년도 정부재원(교육과학기술부 인문사회연구역량강화사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2009-32A-B00205).

<http://dx.doi.org/10.14697/jkase.2013.33.7.1285>

문제 발견은 문제를 인지하는 데에서부터 시작된다. 문제를 인지하는 결정적인 방법은 잠재된 문제가 '해결할 문제가 없는 무형의 상태'에서 '해결해야 할 문제가 있는 유형의 상태'로 어떻게 변하는가를 파악하는 것이다. 이에 대해, 무어(H. Moore)는 미술에서 '별다른 생각 없이 아무렇게나 그린 선들(lines)'을 활용했고 뢰트겐(W. Roentgen)은 과학 사례를 바탕으로 흐릿한 사진 감광판(photographic plate)을 활용하였다(Getzels, 1979). 뉴턴(I. Newton)이 자신의 저서 '광학'에서 제시한 31개 질문(Iliffe & Mandelbrote, 2013)과 같이, 문제를 찾아내고 구체화하는 것은 궁극적으로 얻게 되는 해결책만큼이나 과학적 성취와 발달에 있어 중요하다.

문제의 유형은 분류하는 관점에 따라 다양하다. 문제의 유형은 그 문제가 얼마나 정교화 되었는가에 따라 구조화된 문제와 비구조화된 문제로 분류되기도 하고, 문제의 형식에 따라 논리 문제, 알고리즘 문제, 스토리 문제, 의사결정 문제, 정책 문제, 디자인 문제 등으로 분류되기도 한다(Jonassen, 2011). 겐젤스(Getzels, 1979)는 문제의 유형을 크게 '제시된 문제(presented problem)', '발견된 문제(discovered problem)', '창조된 문제(created problem)'의 3가지 유형으로 구분하였다. '제시된 문제(presented problem)'는 학생들이 학교에서 치르는 시험이나 과학 올림피아드 시험의 문제들로 문제에 대한 해답이 이미 정해져 있는 경우가 대부분이다. '발견된 문제(discovered problem)'는 이미 어떤 문제가 존재하거나 다른 누군가가 문제를 제시한 경우가 아니다. 자기 스스로 찾아낸 문제로, 익히 알려진 공식이나 해결 방식 혹은 그 해답이 있을 수도 있고 없을 수도 있다. 예로서, 뢰트겐이 다른 사람들이 알아차리기 전에 먼저 흐릿한 사진 감광판을 보고 '감광판이 왜 흐릿해졌을까?'라고 질문하는 경우이다. 이는 이상한 현상을 보고 궁금하여 스스로 제기한 문제로, 나중에 X-ray를 발견하는 토대가 되었을 뿐만 아니라, 원자과학의 혁명을 가져오게 된다. 이 경우, 문제는 타인에 의해 제시된 것이 아니라, 그 스스로 찾아낸 것이다. '창조된 문제(created problem)'는 누군가가 문제를 창조해내거나 만들어 내지 않는 한, 문제 자체가 존재하지 않는다. 예를 들어, 마이어(S. Meyer)가 퍼즐 시리즈를 창안하거나 피실험자를 대상으로 문제 해결 능력을 테스트하기 위한 문제들을 발명하는 것이다. 즉, 과학

자가 '빛의 본질은 무엇이고 속도는 얼마나 빠르나?' 하는 문제를 착상하는 것이다. 겐젤스(Getzels, 1979)에 따르면, 이러한 문제들은 무엇인가를 발견하고 구체화하기 위해 노력해 나가는 상황이다.

과학적 문제를 발견하는 과정도 다양하다. 겐젤스(Getzels, 1979)는 '기존 문제에 대한 새로운 해결책을 찾는 과정에서 새로운 문제가 나타나게 되는 문제의 기본적 속성이 있음에도 불구하고, 문제를 발견하고 이를 구체화시키는 방법에 대해서는 거의 알려진 바가 없다.'고 말했다. 비록 문제 해결을 위한 여러 이론적 진술과 수많은 심리측정 도구 및 경험적 연구가 있었음에도 불구하고 문제 발견 과정에 대한 체계적인 연구는 거의 이루어지지 않았음을 지적하였다. 케플러(J. Kepler)의 시각 이론 형성 과정에서의 문제 발견을 분석한 연구(Kim, 2006)에 따르면, 그의 문제 발견 과정은 "당시 이론이나 설명의 불충분, 모순, 또는 오류에서 발견된 문제"로 볼 수 있다. 또한 카르노(S. Carnot)의 열기관 이론 형성 과정에서 귀추적 사고와 문제 발견에 대해 분석한 연구(Kim, 2010)에서 카르노의 문제 발견 과정은 '비유 추론에 의한 문제 발견'의 경우로 볼 수 있다.

케플러, 카르노 등이 보인 문제 발견의 과정을 단순히 발견된 문제인가, 창조된 문제인가가 아니라 다른 각도에서 분석하면서, 문제 발견 과정이 다양하지만 어떤 패턴이 있음을 찾아 낼 수 있었다. 이러한 창의적 과학자들의 문제 발견 과정을 분석하여 패턴들을 탐색한 결과는 학생들의 문제 발견 능력 향상을 위한 프로그램을 개발하는 데 유용하게 쓰일 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 케플러, 카르노의 문제 발견 과정뿐만 아니라 이를 좀 더 확대하여 잘 알려진 창의적인 과학자들의 문제 발견의 과정에 대한 여러 사례들을 분석하고 정리함으로써 문제 발견의 과정에서 나타나는 패턴들을 밝히는 데 목적을 두었다. 이에 본 연구의 연구 문제를 '창의적 과학자들의 문제 발견의 패턴은 어떠한가?'로 설정하였다.

II. 연구방법

본 연구에서는 '창의적 과학자들의 문제 발견의 패턴은 어떠한가?'의 연구 문제를 해결하기 위해 다음의 연구방법을 적용하였다.

1. 연구대상 과학자 선정

본 연구에서는 다음의 준거에 근거하여 잘 알려진 창의적 과학자를 선정하였다. 첫째, 연구 결과물 및 관련 문헌이 풍부해야 한다. 둘째, 물리, 화학, 생명과학, 지구과학의 영역에서 선정한다. 셋째, 17세기 초기 근대 과학 시대 이후의 과학자 가운데 과학과 교육 과정 및 과학 교과서에서 중요하게 언급되는 내용에 관련되는 과학자를 선정한다. 이렇게 하여 선정된 과학자는 다음과 같다. 물리학과 지구과학의 갈릴레이(G. Galilei), 케플러(J. Kepler), 영(T. Young), 카르노(S. Carnot), 패러데이(M. Faraday), 뢰트겐(W. Röntgen)을 선정하였고, 화학과 생명과학에서는 라부아지에(A. Lavoisier), 러더퍼드(E. Rutherford), 멘델(G. Mendel), 왓슨(J. Watson)을 선정하였다. 이들 과학자 10명의 문제 발견의 과정을 분석하기 위한 과학사적 사건은 <Table 1>과 같다.

2. 문제 발견의 패턴을 분석하기 위한 분석 준거

본 연구에서 선정한 창의적 과학자 10명의 문제 발견의 과정에서 나타나는 패턴을 분석하기 위한 분석 준거는 다음과 같이 설정하였다.

- (1) 해당하는 과학사적 연구를 수행한 당시의 상황은 어떠한가?
- (2) 문제 발견 과정은 어떠한가? 본 연구에서 문제 발견은 과학적 의문 또는 질문의 제기에서부터 문제를 형성하기까지의 과정을 의미한다.

(3) 문제 발견 과정에서 어떤 패턴을 보였는가?

본 연구에서는 분석 준거에 따라 각 과학자에 대해 분석한 후, 문제 발견의 패턴을 탐색하고, 각 패턴에 대해 2, 3가지 사례를 상세하게 제시하는 방식으로 서술하였다.

Ⅲ. 연구 결과

본 연구에서는 창의적 과학자 10명의 문제 발견의 패턴을 찾아내기 위해 이들의 문제 발견의 과정을 분석하였으며, 분석 자료로부터 얻어진 문제 발견의 패턴을 정리한 결과는 다음과 같다.

[패턴 1] 당시 이론이나 설명의 불충분, 모순 또는 오류에서 발견된 문제

창의적 과학자들은 당시 이론이나 설명이 불충분하거나 그 설명이나 이론에 모순 또는 오류가 있음을 발견하고, 이를 과학적 문제로 형성하는 경우가 있다. 이 패턴에는 라부아지에, 멘델, 왓슨의 세 가지 사례를 포함시킬 수 있다.

패턴 1-1. 연소 이론에서 라부아지에(A. Lavoisier)의 문제 발견

당시 과학사적 상황

라부아지에가 연소에 대한 연구 활동을 수행하려고 할 때 거의 모든 과학자들은 플로지스톤설을 믿고 있

Table 1

List of ten scientists and their scientific breakthrough in the study

영역	과학자	과학사적 사건
물리학과 지구과학	갈릴레이 (Galileo Galilei, 1564-1642)	- 달 표면 모양과 태양 흑점 발견
	케플러 (Johannes Kepler, 1571-1630)	- 시각 이론 형성
	영 (Thomas Young, 1773-1829)	- 빛의 간섭 이론 형성
	카르노(Sadi Carnot, 1796-1832)	- 카르노 열기관 이론 형성
	패러데이 (Michael Faraday, 1791-1867)	- 전기력선과 자기장 발견
	뢴트겐 (Wilhelm Röntgen, 1845-1923)	- X-선 발견
화학 생명과학	라부아지에 (Antoine Lavoisier, 1743-1794)	- 연소 이론 형성
	러더퍼드 (Ernest Rutherford, 1871-1937)	- 알파입자 되튐 현상 발견
	멘델 (Gregor Mendel, 1822-1884)	- 식물의 잡종 형성과 유전
	왓슨 (James D. Watson, 1928-)	- DNA 구조

었다. 슈탈(Stahl)은 플로지스톤을 함유하고 있는 물질을 연소하면 플로지스톤이 그 물질로부터 빠져나간다고 하였다. 플로지스톤은 그것을 함유하고 있는 물질에서 빠져 나올 때만 검출되며 단독으로는 존재할 수 없으며 직접 지각할 수도 없다고 주장하였다. 그래서 플로지스톤은 불, 열, 빛의 형태로 나타난다고 하였다. 즉 연소는 플로지스톤을 잃는 것이고, 남은 재는 플로지스톤이 없어진 원래의 물질인 것이다. 이와 같이 주장되는 플로지스톤설은 많은 화학적 사실을 확립적으로 설명할 수 있었다. 공기 중에서 숯을 태우면 소량의 재만 남았기 때문에 숯은 플로지스톤이 풍부한 물질이고 재는 숯에서 플로지스톤이 빠져 나간 것으로 설명되었다. 이를 금속에도 적용하여 금속은 금속재와 플로지스톤이 결합한 것이라고 하였다(Yoo, 1990).

문제의 인식과 형성

라부아지에는 ‘연소에서 공기가 관여되는 것이 아닐까?’라는 질문을 던지면서부터 문제 발견이 시작되었다. 그는 분말 형태의 가열산화물이 금속으로 환원될 때 기포가 발생한다는 것을 알고 있었으며 이것이 공기의 발생 때문이 아닐까라고 생각하였다. 그러나 플로지스톤설에 따라 금속이 산화하는 과정에서 무게가 증가한다는 사실을 플로지스톤이 때로 음의 무게를 가질 수도 있다는 비교적 만족스럽지 못한 설명을 할 수 밖에 없었다. 그럼에도 불구하고 18세기 초반까지 정량적인 문제는 화학자들의 관심의 대상이 아니었기 때문에 이를 심각하게 생각하는 사람은 거의 없었다. 또 전에 없이 화학적 사실들을 통일된 이론으로 설명할 수 있는 플로지스톤설은 그것만으로도 충분히 화학자들 사이에서 환영받았다. 그래서 플로지스톤설은 많은 화학자들의 지지를 받으며 17, 18세기 화학의 한 패러다임으로 작용하였다. 라부아지에는 1771년 동료인 드모르보(L. de Morveau)가 구리, 철, 주석, 안티몬, 비스무트, 아연 등의 금속을 공기 중에서 가열하여 무게가 증가한다는 것을 보여주자 연소에 대해 관심을 가지기 시작했다.

그런데 드모르보는 금속을 가열했을 때 무게가 증가한 것은 금속 안에 있던 플로지스톤이 무게가 없어 금속을 들어 올렸기 때문이라고 설명하였다. 플로지스톤설을 신봉했던 드모르보는 당시의 패러다임인 플로지스톤설로 자신의 실험을 설명하였지만 라부아지에는 드모르보의 실험 결과에 흥미를 느끼면서 동시에 플로지스톤

설에 근거한 드모르보의 설명에 의문을 품고, 1772년부터 본격적으로 연소에 대한 실험을 시작하였다. 그는 연소가 플로지스톤설로는 설명되지 않는다고 생각하였고, ‘연소와 공기는 어떤 관련이 있는 것인가?’라는 문제를 형성하여 문제 해결을 위한 노력을 시작하였다(Hudson, 1992; Kim, 1998; Meadows, 1987). 이러한 문제 발견은 플로지스톤에 대한 설명에서 그 모순점을 찾아 문제를 발견한 유형이다.

문제 해결

라부아지에는 과학 아카데미 동료들과 큰 렌즈를 이용하여 다이아몬드를 가열하는 실험을 하였다. 그 결과 다이아몬드는 공기가 있을 때는 연소했지만 공기가 없을 때는 연소하지 않았다. 라부아지에는 공기가 있어야 연소가 가능하다는 결론을 내리고 연소에 대해 더 많은 호기심을 가졌다. 그 후 라부아지에는 혼자서 인과 황의 연소 실험을 하였고, 연소 후 인과 황은 무게가 증가하는 것을 알아내었다. 또 반대로 연소한 금속재를 숯과 함께 가열해 무게가 감소하는 것도 알아냈다. 1772년 11월, 라부아지에는 이러한 실험 결과들을 모아 인과 황을 연소하면 공기를 흡수하여 질량이 증가하고, 금속재를 가열하면 공기를 잃고 금속이 생기면서 질량이 감소한다는 것을 통해 무게가 증가되는 모든 연소와 가열 산화의 경우 공기의 고정이 일어나며, 가열 산화물이 환원되면 공기가 발생한다는 가설을 과학 아카데미에 제출하였다. 라부아지에는 연소에 대한 자신만의 가설이, 자신의 실험과 공기에 관한 다른 연구자들의 결과를 하나로 통합할 수 있는 혁명적인 이론으로 탄생할 수 있음을 직감하였다. 1773년, 한 해 동안 공기에 대한 모든 글을 찾아 읽고 화학자들이 수행한 실험을 수없이 반복하였다. 1774년 1월, 라부아지에는 그간의 연구와 실험 결과를 모아 첫 저서인 ‘물리와 화학 소론(Opusculs Physique et Chimiques)’을 발간하였다(Cho, 1997; Mason, 1962; Meadows, 1987; Lee, 1997).

패턴 1-2. 유전형질의 수학적 법칙 형성과정에서의 멘델(G. Mendel)의 문제 발견

당시 과학사적 상황

18세기 말 영국에서는 식물의 생산량을 증가시키기 위해 재배종을 체계적으로 조사하기 시작하였다.

1787년 영국의 과학자 나이트(T. Knight)는 식물성장에 대한 새로운 방향을 제시하는 실험결과를 발표하였다(Orel, 1996). 그는 논문에서 인공수정을 통해 새로운 변종을 지속적으로 만들어낼 필요가 있다고 제안하였다. 이어 1824년 영국에서 세턴(A. Seton)과 고스(J. Goss)는 완두콩을 재료로 한 실험논문을 발표하였다. 이 논문들은 곧 독일어로 번역되었으며, 멘델은 독일어 판으로 공부할 수 있게 되었다. 이 논문들은 완두콩 씨앗의 특징에 대해 잡종자손에서의 우성과 형질 분리를 설명하고 있었다(Orel, 1996). 1849년 독일 식물학자 게르트너(F. Gärtner)는 식물잡종에 대한 방대한 논문집을 발표하였다. 멘델은 이 논문을 지니고 있었고, 논문 여백에 쓴 노트를 미루어 그가 여러 번 그 논문에 대해 자세히 공부했음을 짐작할 수 있다. 따라서 멘델은 당시 식물잡종 형성에 대한 최신 연구 경향과 관련 지식을 알고 있었던 것으로 유추할 수 있다.

문제의 형성

멘델은 당시 관련 논문들을 읽으면서 ‘잡종 형성과 발생에 일반적으로 적용할 수 있는 법칙이 있지 않을까?’ 하는 과학적 의문을 가지게 되었다(Yang & Koo, 2005). 게르트너는 자신의 논문에서 나중에 소위 멘델의 유전 법칙으로 정의될 내용과 관련된 거의 모든 현상들을 기술했으나, 가장 중요한 수량적 분리비를 제외시키고 발표하였다. 이 부분으로부터 멘델은 기존 이론과 설명의 불충분성을 발견하게 된다. 멘델은 게르트너의 논문에 대해, ‘게르트너는 논문에서 실험방법을 상세히 설명하지 않아서, 어떤 실험도 완벽히 동일하게 반복할 수가 없었다. 그러나 그의 실험 가운데 완두콩 실험의 경우에는 대부분 동일한 결과를 얻을 수 있었다’(Stern & Sherwood, 1966)라고 말한 바 있다. 또한 게르트너 논문에는 ‘잡종의 형성과 발생에 관하여 일반적으로 적용할 수 있는 법칙은 아직 확립되어 있지 않다’고 지적하였다(Yang & Koo, 2005). 멘델은 이러한 연구결과에 대해 불충분한 요소들을 발견하였고, 이 발견은 유전에 대한 통일된 법칙이 있을 수 있으며, 이에 관한 연구의 필요성과 문제를 형성하게 된 계기가 되었음을 알 수 있다.

문제의 해결

실제 멘델은 유전형질은 세포적 수준(현재에는 유

전자)에서 결정된다는 점을 발견하였으며, 이 세포적 수준의 형질은 쌍으로 존재하며 분리와 독립의 법칙에 따라 변형되지 않고 후손에 지속적으로 전달되는 것을 발견하였다(Hartl & Orel, 1992). 멘델은 완두콩의 종자 모양, 종자 색깔, 꼬투리 모양, 꽃의 색깔, 꽃의 위치, 줄기 길이의 7가지 특징에 대해 실험하였으며, 꽃의 색깔에 대한 실험결과에서는 929개 식물 가운데 705개 식물은 보라색 꽃으로, 224개 식물은 흰색 꽃으로 나타났으며, 비율은 3.15:1임을 관찰하였다(Mendel, 1909, 2008년 재출판, p.17-18). 멘델은 완두콩 실험을 통해 잡종자손에서 나타나는 형질에 대한 수학적 관계를 최초로 밝혀냈으며, 분리와 독립의 법칙에 따라 형질이 유전됨을 밝혔다(Hartl & Orel, 1992).

패턴 1-3. DNA 구조에서의 왓슨(J. Watson)의 문제 발견

당시 과학사적 상황

당시 왓슨은 DNA 선형연구 분석을 통해 DNA의 기본 단위는 뉴클레오티드이며, 이 뉴클레오티드는 1개의 인산, 1개의 당, 1개의 염기로 이루어져 있다는 것을 알고 있었다. 염기의 종류에는 아데닌, 구아닌, 시토신, 티민(또는 우라실)이 있으며, 핵산에는 DNA, RNA의 두 종류가 있다는 것을 알고 있었다. 에이버리(O. Avery), 허시(A. Hershey)의 연구결과를 통해 유전물질이 DNA임이 확인되었으며, 샤가프(E. Chargaff)의 연구결과에 의해 아데닌과 티민, 구아닌과 시토신이 1:1의 비로 결합한다는 사실을 알게 되었다. 이어 폴링(Pauling)이 DNA는 삼중 나선 구조를 이루고 있으며 음전하를 띤 뼈대를 안정화하기 위해서 인산들이 수소결합을 통해서 연결된다는 독창적인 제안을 발표했다(Pauling & Corey, 1953).

문제의 인식과 형성

왓슨은 폴링의 DNA 3중 나선에 대한 주장을 분석한 후 그 설명에서 모순을 발견하였으며, 다음과 같은 예측과 주장을 제기하였다. 첫째, X-ray 도식에서 3중 나선구조의 재료가 자유 산(free acid)이 아니고 염(base)이라는 것을 믿었다. 즉 산성인 수소원자가 없다면 어떠한 힘이 그 구조를 연결하여 잡아두고 있는 것인지가 명백하지 않으며, 특히 축 근처의 음전하

로 대전된 인산염 등은 서로 반발할 것이라고 예측하였다. 둘째, 반데르발스(Van der Waals)의 거리 가운데 어떤 것들은 거리가 너무 가깝다는 점이였다(Watson & Crick, 1953). 왓슨은 폴링의 삼중 나선 DNA의 모순을 발견하면서, 다시 한 번 “도대체 DNA는 어떤 구조일까?”라는 과학적 문제를 발견하게 되었다.

문제의 해결

왓슨은 DNA 구조를 밝혀내기 위해 월킨스와 프랭클린의 X선 회절사진(Klug, 1968)을 물리학적 관점에서 분석하였다. DNA X선 회절사진에서 나타나는 뚜렷한 X자 형태를 통해 이중 나선구조를 확인하였으며(Fig. 1), 나선의 높이는 34Å이고, 나선 1회전 당 10개의 뉴클레오티드가 있으므로 기본 염기쌍간 거리는 3.4Å이라는 것을 밝혀 낼 수 있었다(Fig. 2). 왓슨은 “DNA는 이중 나선구조일 것이다.”라는 가설을 설정하였다. 왓슨이 제안한 DNA 이중 나선구조에서 가장 핵심적인 발상은 염기의 배치에 대한 것이다. 왓슨은 DNA의 네 가지 염기의 모형을 만들어 이리저리 맞춰 보며 궁리하던 중 생물학적 직관과 화학적 계산을 통하여 DNA는 바깥쪽에 인산-당 골격을 가지고, 안으로는 염기가 서로 마주보는 두 가닥의 사슬이라고 추정하게 되었다. 철판과 철사로 만들어진 모형에서 두 퓨린을 서로 마주 놓으면 이중나선의 2.0nm폭이 모자라고, 두 피리미딘을 놓으면 틈이 남았다. 그러나 하나의 퓨린과 하나의 피리미딘을 서로 마주 놓으면 꼭 맞았다. 즉 아데닌과 티민, 그리고 구아닌과

시토신 사이에 수소 결합을 만들면 이 두 염기의 쌍은 아주 비슷한 모양을 가지게 되는 것을 깨닫게 되었다. 그래서 디옥시리보오스와 인산염으로 이루어진 나선 모양의 뼈대 두 가닥 사이에 아데닌과 티민, 또는 구아닌과 시토신의 쌍들을 배치하자 근사한 이중 나선 구조의 모델이 얻어졌다.

[패턴 2] 당대 지식으로는 설명되지 않는 이상한 현상을 관찰하면서 발견된 문제

잘 알려진 창의적 과학자들의 문제 발견을 분석한 결과에 의하면, 또 한 가지 유형을 찾아볼 수 있는데, 그것은 그 당시까지 축적된 지식으로는 설명되지 않는 이상한 현상을 발견함에 의해 과학적 문제를 형성하는 경우다. 러더퍼드와 뢰트젠이 이 경우에 포함된다.

패턴 2-1. 러더퍼드(E. Rutherford)의 알파입자 되튐 현상 관찰로 발견된 문제

당시 과학사적 상황

1897년 톰슨(J. Thomson)은 전자를 발견한 후 1904년 기존의 원자 모형에 전자를 추가하기 위해 새로운 원자 모형을 제안하였으며, 이 원자 모형은 양전하로 이루어진 구 속에 전자들이 일정한 간격으로 배치되어 안정된 구조를 이루고 있다는 이론이었다. 톰슨은 이 구조를 다음과 같이 설명하였다: “... 원소의 원자들은 음으로 대전된 입자들¹⁾이, 고르게 양전하로 퍼져 있는 구 속에 갇혀 있는 형태로 구성되어 있다.”

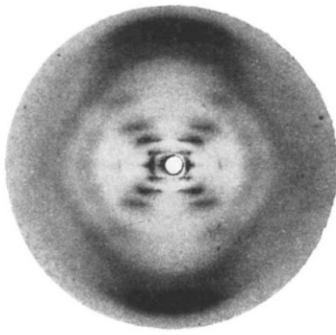


Fig. 1 X-ray diffraction pattern of the sodium salt of DNA
source: Klug (1968) p.808

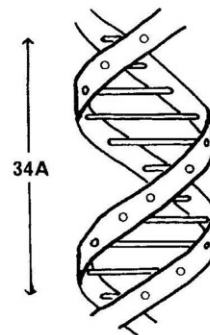


Fig. 2 Diagram of DNA structure showing that there are ten nucleotides in the axial repeat of 34 Å
source: Klug (1968) p. 809

1) 톰슨은 이때까지는 전자라는 용어를 사용하지 않고 이들을 “입자들(corpuscles)”이라고 불렀다.

(Thomson, 1904). 이것은 마치 음전하를 띤 ‘건포도들’이 양전하를 띤 ‘푸딩’ 속에 점점이 박혀 있는 모습이기 때문에 ‘건포도 푸딩 모형’²⁾이라고 명명되기도 했다. 이 모형에서 전자들은 원자 전체에 분포하며, 임의로 분포하고 있는 것이 아니라 회전하는 고리에 위치하고 있다는 것이다. 이 원자 모형은 당시 다른 원자 모형보다 더 설득력 있는 것으로 받아들여졌다(Kragh, 2010). 이 시기에 러더퍼드는 캐번디쉬 연구소에서 원자, 전자, 방사능에 대해 연구하고 있었다. 그는 1906년에 느린 속도의 알파입자를 알루미늄 박을 통과시키는 실험을 진행하고 그것에 나타난 전기적 특성을 발표하였는데, 여기서 그는 알파입자가 2° 정도 산란되는 현상을 관찰하였다고 한다(Rutherford, 1906). 그 후 러더퍼드와 그의 제자들은 기존에 알파입자를 측정하던 전기적 계수 방법을 개선시켜서, 섬광 계수방법을 사용하여 실험을 하였으며, 이 실험을 직접 수행하던 가이저(H. Geiger)와 마스덴(E. Marsden)은 빠른 속도의 알파입자가 6×10^{-5} cm 두께의 금박을 지나갈 때 90° 이상의 산란이 일어나는 현상을 관찰하였다.

문제의 인식과 형성

가이저와 마스덴이 관찰한 산란 현상은 즉각 러더퍼드에게 보고되었으며 러더퍼드는 이 문제를 심각하게 받아들였다(Kragh, 2010). 러더퍼드가 가이저와 마스덴의 실험 결과를 심각하게 받아들였던 이유는 러더퍼드가 1906년 연구를 통해 알파입자의 특성과 본질을 알고 있었고, 그 특성에 따르면 이 산란 현상은 기존의 톰슨의 원자 모형으로는 설명될 수 없는 현상이었기 때문이다. 이에 러더퍼드는 ‘90° 이상의 알파입자 산란을 보이는 원자는 어떤 구조일까?’라는 문제를 형성하게 된다. 이렇게 인식되고 형성된 문제는 당대 지식으로는 설명되지 않는 이상한 현상을 관찰함으로써 형성된 문제 패턴이라고 볼 수 있다.

문제 해결

당시에 이온의 본질이 충분히 알려져 있지 않았지만, 러더퍼드는 알파입자가 헬륨에서 전자 2개가 빠져나간 것과 동일하다는 것을 알고 있었다. 러더퍼드는 가이저와 마스덴의 실험 결과를 면밀히 검토하는

한편, 크라우서(Crowther)가 1910년 실시했던 베타 입자 산란실험 결과와 비교하고 종합하여 1911년 러더퍼드의 원자 모형을 발표하게 된다(Baily, 2013; Rutherford, 1911).

패턴 2-2. 뢰트겐(W. Röntgen)의 X-선 관찰로 발견된 문제

당시 과학사적 상황

1892년 헤르츠(H. Hertz)는 음극선이 얇은 금박을 통과할 수 있다는 것을 발견했다. 이 새로운 현상을 발견한 헤르츠는 그의 제자인 레나르트(P. Lenard)에게 이 실험을 계속해 볼 것을 권유했다. 레나르트는 음극선관의 한쪽 끝에 얇은 알루미늄 판(‘레나르트 창문’)을 대어서 여기에 음극선을 쏜 다음 이 금속 창문을 통과해서 나오는 광선의 성질을 여러 기체들 속에서 면밀하게 점검했다. 이 실험에서 레나르트는 음극선에 관한 여러 가지 중요한 성질들을 관찰했다. 1894년 5월 레나르트는 뢰트겐으로부터 음극선을 금속 박판에 쏘기 위한 실험 장치에 관한 문의를 받았고, 뢰트겐에게 ‘레나르트 창문’에 사용되는 금속 박판을 만드는 방법을 알려주었다. 레나르트의 도움을 받아 뢰트겐은 레나르트가 했던 실험을 반복해 볼 수 있었다(Im, 2001).

문제의 인식과 형성

1895년 11월 초, 뢰트겐은 레나르트 진공관 중의 하나로 실험을 반복하고 있었다. 그는 히르토프-크루스 진공관을 마분지로 덮고 전하를 발생시키는 룬코르프 유도 코일(Ruhmkorf induction coil)에 전극을 연결했다. 그가 룬코르프 코일의 전하를 진공관을 통해 흘려보내는 동안 마분지 덮개가 빛이 새나오지 못하도록 막고 있었다고 생각한 그 때, 뢰트겐은 진공관에서 1미터쯤 떨어진 곳에서 희미한 발광이 있는 것을 관찰하였다. 당연히 그는 여러 번 방전을 시켜보았고, 매번 발광이 일어나는 것을 확인했다. 그리고 그 빛이 백금시안화바륨 묽음이 있는 곳에서 발생한 것임을 알았다. 이 관찰은 그로 하여금 ‘레나르트 진공관 근처의 백금시안화바륨에서 발생하는 빛은 어떤 빛일까?’라는 의문을 갖게 했으며, 이것은 그가 해결을 시

2) ‘건포도 푸딩 모형’은 톰슨 자신이 그렇게 부른 것은 아니며 다른 과학자들에 의해 영국의 디저트 음식인 건포도 푸딩에 비교되었으며 그것으로부터 이 이름을 가지게 되었다.

도하게 된 과학적 문제의 형성이었다. 이 과학적 문제는 러더퍼드의 문제 발견과 마찬가지로 당대 지식으로는 설명되지 않는 이상한 현상을 관찰함으로써 형성된 문제 발견 패턴이라고 볼 수 있다(Friedman & Friedman, 1998; Im, 2001; Kevles, 1996).

문제 해결

뢴트겐은 그것이 새로운 종류의 광선일 것이라고 추측했다. 왜냐하면 당시 관점에서 보면 그것은 빛 때문에 생긴 것이었고, 진공관은 마분지로 뒤덮여 있어서 관에서 빛이 나온다는 것은 불가능한 일이었기 때문이다. 그는 실험을 반복하면서 X선이라고 임시로 이름붙인 새로운 광선의 특징들을 연구하였다. 그 발견으로부터 몇 주가 지난 후, 자신의 아내를 실험실로 불러서 그녀의 손을 X-선으로 찍어보았는데, 이때 처음으로 살아있는 사람의 뼈를 사진으로 찍을 수 있음을 확인했다. 이리하여 12월 28일 뢰트겐은 그간의 실험을 정리해서 뷔르츠부르크 물리·의학 학회지에 ‘새로운 종류의 광선에 관해서(On A New Kind Of Rays)’라는 논문을 투고하였으며(Friedman & Friedman, 1998; Im, 2001; Kevles, 1996), 이로부터 새로운 광선의 존재가 세상에 알려지게 되었다.

[패턴 3] 유사성과 비유사성 추론에 의한 문제 발견

창의적 과학자들의 문제 발견을 분석한 결과에 의하면, 또 다른 유형을 찾아볼 수 있는데, 그것은 유사성과 비유사성 추론(analogical reasoning)에 의해 문제를 발견하는 경우이다. 카르노, 영의 문제 발견 사례가 여기에 포함된다.

패턴 3-1. 카르노(S. Carnot)의 유비적 추론과 그로부터의 문제 발견

당시 과학사적 상황

카르노는 수력 기계를 열기관의 원리에 도입하는 귀추적 사고를 통하여 열기관 이론을 수립했다. 그가 언급한 수력기계와 열기관의 비유 관계를 보면 <표 2>와 같다(Carnot, 1824).

카르노는 열기관에서 만들어내는 열의 동력 발생이 물레방아와 같은 수력기계의 경우 높은 곳에서 떨어지는 물에 의한 동력 발생과 유사하다는 것을 발견하고 수력기계에서의 동작 원리를 빌려 와 열기관의 원리를 고안하고 설명하는 카르노 열기관 이론을 수립하였다. 카르노는 여기에서 그치지 않고 두 기관의 비유 관계 분석으로부터 새로운 아이디어를 얻게 된다.

문제의 인식과 형성

카르노는 비유 관계를 통해 열 엔진의 원리를 설명하고 난 다음, 열 엔진과 수력 엔진에서의 유사성과 비유사성을 분석함에 의해서 새로운 문제를 인식하게 된다. 그는 다음과 같은 의문을 제기하였다(Carnot, 1824, p.15): “폭포에서는 수위가 높은 곳과 낮은 곳의 높이차에 정확히 비례하는 동력(motive power)이 발생한다. 그런데 열소의 낙하 경우, 동력은 뜨거운 물체와 찬 물체의 온도차가 커지면 증가하지만, 그 차에 정확히 비례하는지는 알 수 없다. 즉, 온도가 100도³⁾인 곳에서 50도인 곳으로 떨어질 때의 열소는 50도에서 0도로 떨어질 때의 열소보다 많거나 적을 수 있다.” 이렇게 그는 <Table 2>에서의 비유 관계가 ‘수력기계의 경우 폭포의 높이 차가 클수록 폭포의 동력도 커지는 것처럼, 열기관의 경우에서는 온도차가 클수록 열의 동력도 커진다.’와 같이 유사한 측면이 있지만, ‘수력기계에서 폭포의 동력은 높이 차에 정확히 비례하는데 열기관에서 열의 동력은 정확히 비례할까?’와 같은 의문을 갖게 된 것이다. 카르노의 이러한 사고 과정에서 볼 때 그는 유사성과 비유사성 추

Table 2
Analogy between power of heat and power of waterfall by Carnot

실제 관찰한 수력 기계		유비를 통한 열 기관 이론	
폭포의 동력		열의 동력	
폭포의 높이	높은 수위 ————— 낮은 수위	온도의 차이	높은 온도 ————— 낮은 온도
물의 흐름		열소(caloric)의 흐름	

3) Carnot 논문(1824)에서 100 degree라고 표현하였으므로 여기서는 100도라고 번역하였다.

론을 통해 과학적 문제를 인식하고 형성했다고 볼 수 있다.

문제 해결

그는 실제 실험을 통해 ‘주어진 열(당시에는 열소)이 고온에서 낙하할 때보다 저온에서 같은 온도만큼 낙하할 때 더 많은 동력이 생산된다.’ (Carnot, 1824)는 것을 알아냄으로써 열기관 이론에 이어 다음과 같은 열효율 개념을 형성하게 되었다: 열효율, $\eta = (K1 - K2)/K1 = \Delta K / K1$.

패턴 3-2. 빛의 유사성 추론에 의한 영(T. Young)의 문제 발견

당시 과학사적 상황

토마스 영(T. Young)이 과학적 연구 활동을 할 당시에 빛은 입자인 것으로 알려져 있었다. 특히 뉴턴이 빛은 입자인 것으로 강하게 주장하고 있었다. 그러나 영은 1790년 가을에 뉴턴의 ‘프린키피아’와 ‘광학’을 읽었으며, ‘프린키피아’에서는 뉴턴이 말하고자 하는 모든 것을 이해할 수 있었으나 ‘광학’에 대해서는 만족감을 가질 수 없었다고 한다.

문제 인식과 형성

이 시기에 토마스 영은 투명한 얇은 막에서 여러 가지 색이 나타나는 현상에 대해 주목하고, 이 현상이 소리에서 나타나는 현상과 유사하다고 생각하였다. 그리고 ‘빛과 소리 사이에 지금까지 자신이 알고 있던 것보다 더 밀접한 유비(a closer analogy)가 존재하는 것이 아닐까?’라는 의문을 가졌다. 특히 뉴턴 링에서 같은 색깔이 반복적으로 나타나는 현상에 주목했다.

영은 빛의 성질에 대해 다음과 같이 소리와 관련지어 유사성을 추론하였다(Young, 1804): “뉴턴 링 실험에서 렌즈 아래 공기층의 두께가 산술적인 배수로 커질 때마다 동일한 색이 나타나는 것은 파이프오르간에서 파이프 길이가 산술적인 배수로 커질 때마다 동일한 소리가 생성되는 것과 매우 유사하다”(Fig. 3).

[Fig. 3]에서 왼쪽의 경우는 파이프오르간에서 나는 소리의 경우이고 오른쪽은 뉴턴 링에서 나타나는 빛의 색깔을 보여준 것이다. 파이프 오르간에서 나는 소리의 경우, 파이프의 길이가 늘어남에 따라 어떤 길이의 정수배가 되면 낮으면서도 같은 소리가 난다. 이와 마찬가지로 뉴턴 링에서 보면 췌기 모양의 렌즈 아래 공기기둥 높이에 따라 반복적으로 같은 색깔의 띠가 나타남을 보인다. 이 당시에 소리가 파동인 것은 이미 알려져 있었으며, 이에 대한 실험을 통해 충분한 지식을 갖추고 있었던⁴⁾ 영은 ‘소리와 같은 성질을 보이는 빛도 파동이지 않을까?’라는 과학적 의문을 가지고 계속 탐구하게 된다(Young, 1800). 이것은 소리와 빛의 유사성 추론을 통한 문제 발견에 속한다고 볼 수 있다.

문제 해결

이 후에도 영은 수면파에서 나타나는 회절 현상과 빛에서 보이는 회절 현상에 대한 유사성 추론을 통해 빛이 파동의 성질을 가진다는 것에 대해 점점 더 확신하게 되며, ‘영의 이중 슬릿 실험’이라고 하는 결정적 실험을 통해 빛의 파동성을 증명하였다.

[패턴 4] 새롭게 발명된 실험 기기로 새로운 현상의 관찰에 의한 문제 발견

창의적 과학자들의 문제 발견을 분석한 결과에 의

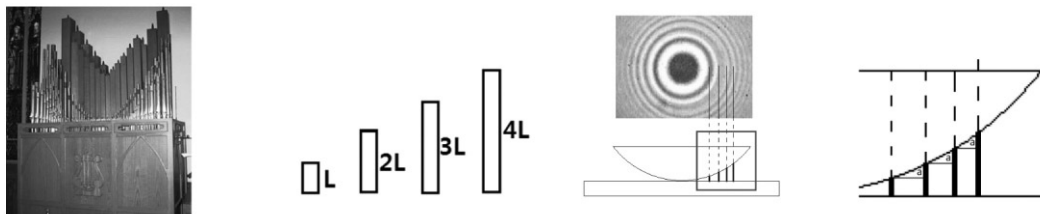


Fig. 3 Similarity inference between sound from a pipe organ and light color on the Newton ring

4) 1800년 영은 ‘Outlines of Experiments and Inquiries Respecting Sound and Light’의 저서에서 소리에 대한 여러 가지 실험 내용을 다루고 있었으며, 소리의 생성에 대한 실험을 통해 인식하기 시작한 소리와 빛 사이의 밀접한 비유에 관한 내용을 소개하였다.

하면, 또 다른 한 가지 유형을 찾아볼 수 있는데, 그것은 새롭게 발명된 관찰 또는 관측기구를 사용하여 새로운 현상을 관찰함에 의해 문제를 발견하는 경우이다. 갈릴레이의 달 표면과 태양의 흑점을 관찰한 사례가 여기에 포함된다.

패턴 4-1. 갈릴레이(G. Galilei)의 달 표면 모양에 관한 문제 발견

당시 과학사적 상황

갈릴레이 이전의 과학자들은 아리스토텔레스의 설명을 따라 하늘의 천체들은 모두 완벽하고 매끄러운 구형이라고 믿고 있었다. 달도 천체이기 때문에 완전하고 매끄러운 구형이라고 생각했다. 이 시기에 갈릴레오는 망원경을 발명하게 되고 천체들을 망원경을 통해 관측하게 된다.

문제 인식과 형성

갈릴레이는 자신이 발명한 망원경을 통해 달을 주의 깊게 관찰하면서 달의 표면이 그 동안 과학자들이 믿어 왔던, 매끄럽고 일정하며 완전한 구의 모습이 아닐 수 있다고 생각하였다(Fig. 4). 주의 깊은 관찰을 통해 그는 달의 표면이 매끄럽지도 않고, 일정하지도 않으며, 완전한 구의 모습도 아니라는 것과 오히려 그 표면이 울퉁불퉁할 수도 있다고 생각하였다. 그 당시에 형성된 새로운 과학적 문제 중의 하나는 ‘달은 완전한 구형인가, 울퉁불퉁한가?’였다. 이렇듯 새로운 관찰 도구의 발명은 새로운 문제를 발견하게 했다.

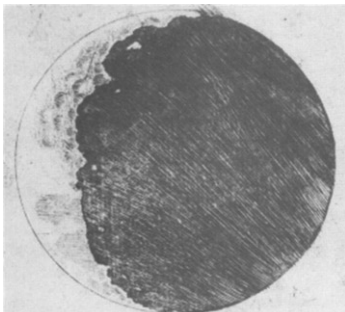


Fig. 4 Galilei's drawing of the moon based on his observation
source: Cohen (1985) p.70

문제 해결

당시에 아리스토텔레스적인 생각으로 천체는 완전

해야 하기 때문에 달 표면도 매끄러워야 한다고 주장했던 사람들은 망원경을 통해 관찰한 사실을 근거로 한 ‘달 표면 모양이 지구와 마찬가지로 울퉁불퉁하다.’는 설명을 믿지 않았다. 이들은 달 표면이 울퉁불퉁하게 보이지만 실제로는 보이지 않는 물질이 움푹 들어간 부분을 메우고 있어서 실제로는 매끈하고 완전한 원을 이룬다고 애드 혹 가설을 이용하여 억지 주장을 폈지만(Chalmers, 1982), 계속되는 관찰에 의해 달 표면이 완전한 구형이 아니라는 것이 증명되었으며, 과학기술의 발달로 달 표면 착륙이 가능해지면서 더욱 확고해졌다.

패턴 4-2. 갈릴레이(G. Galilei)의 태양 흑점에 관한 문제 발견

당시 과학사적 상황

아리스토텔레스적인 사고에 바탕을 두고 당시 과학자들은 태양도 완전한 구형이라고 생각하고 있었다. 그러나 갈릴레이에 의해 망원경이 발명되면서 태양 표면에 대해서도 활발한 관찰이 이루어졌다. 갈릴레이를 비롯한 몇몇 사람들에 의해 태양 주위의 흑점이 발견되었다.

문제 인식과 형성

태양 표면 주위에서 흑점이 발견되면서, 흑점을 좀더 자세히 관찰하게 되었는데, 당시의 기록에 의하면, ‘흑점들은 같은 방향으로 이동한다.’, ‘흑점들은 달에서 관측되는 점들보다 검지 않다.’ 그리고 ‘흑점들은 생성되기도 하고 소멸되기도 한다.’는 관찰 사실을 보았다. 이러한 관찰 사실을 바탕으로 ‘이 흑점이 무엇이며, 어떤 성질을 가진 것인가?’는 당시 과학자들이 해결해야 할 과학적 문제로 대두되었다. 이 문제 또한 새로운 기기의 발명으로 새로운 현상이 관찰되면서 형성된 문제에 속한다.

문제 해결

그 흑점의 성질에 대한 설명은 각기 달랐다. 즉, 흑점을 관찰한 다음에 이들이 귀추적으로 생각한 흑점의 성질은 달랐다는 것이다. Drake(1957)가 쓴 “Discoveries and Opinions of Galileo”에는 흑점이 발견된 뒤의 흑점의 성질에 대한 논쟁이 잘 나타나 있다. 샤이너(C. Scheiner)는 태양의 표면에 얼룩이

나타났다 사라졌다 한다면 천체에 대해 지금까지 믿어왔던 천체의 깨끗함이나 불변성이 훼손되기 때문에 이를 피하기 위해 태양 주변에 몇 개의 작은 행성들이 회전하고 있어서 이들이 사람의 시야를 가리기 때문에 흑점이 생기는 것으로 설명하였다. 이렇게 설명하면 태양 흑점은 태양에 속해 있는 것이 아니라 행성의 운동에 따라 이동하는 것이 된다. 그러나 갈릴레이는 흑점이 태양에 속해 있는 물질로, 태양표면 위에 있거나 표면에서 떨어져 있더라도 지구에서 보이는 구름 높이 이상은 아닌 것으로 생각하였다. 결국 갈릴레이의 설명이 옳은 것으로 후대에 판명되었다.

[패턴 5] 연구 프로젝트 수행 중에 그 연구와 관련되어 생성되는 문제 발견

창의적 과학자들의 문제 발견을 분석한 결과에 의하면, 또 한 가지 유형을 찾아볼 수 있는데, 그것은 이들이 연구를 진행하는 도중에 그 연구와 관련된 과학적 문제를 발견한다는 것이다. 패러데이와 케플러의 경우가 여기에 포함된다.

패턴 5-1. 패러데이(M. Faraday)의 연구 수행 중의 문제 발견

당시 과학사적 상황

전자기와 관련한 패러데이의 첫 번째 발견은 자석 주위에 철가루가 뿌려진 모양을 보고 자기력선 개념을 추론해 낸 것이다(Fig. 5). 그가 추론한 자기력선 개념은 다음과 같다: ‘자석 주위에는 자기력선이 존재한다.’; ‘자기력선은 곡선이다.’; ‘자기력선의 방향은 곡선 상의 한 점에서의 접선 방향이다.’ (Hong, 1986)

다른 문제 인식과 형성

자기력선 개념을 추론한 후에 그는 자기력선과 관련하여 연속적인 문제를 형성해간다. 그 한 가지가 ‘자석 내부에도 자기력선이 존재하는가?’ 이다. 즉, 지금까지의 그의 관찰과 실험은 자석 외부에 존재하는 자기력선에 관한 것이었다. 그는 자기력선 개념을 자석 내부에까지 확장하여 존재 여부에 대해 의문을 보인 것이다.

문제 해결

이 문제를 해결하기 위해 패러데이는 [Fig. 6]과 같이 막대자석을 여러 개 묶고 그 사이에 전선을 넣어 유도 전류가 생기는 지 실험해 보는 등의 여러 가지 실험을 하게 된다.

패러데이의 이 연구 문제는 잘 해결되어 현행 물리학 교과서에서는 자석 내부에 자기력선(또는 자기장

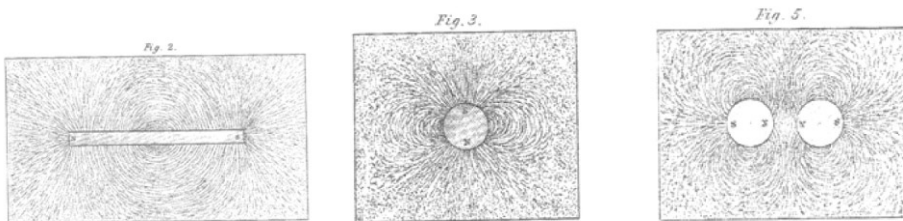


Fig. 5 Faraday's drawing of iron filings scattered on magnets source: Faraday (2005). Appendix

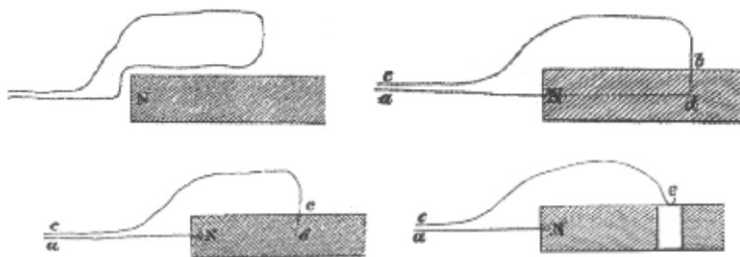


Fig. 6 Faraday's various experiments to explore magnetic force lines inside of magnet source: Faraday (2005). pp. 337-340.

선)을 [Fig. 7]과 같이 그려서 설명하고 있다.

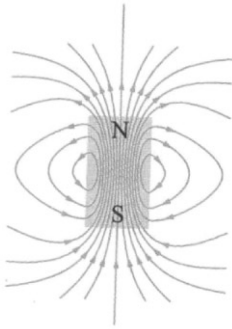


Fig. 7 Magnetic field lines inside a bar magnet
source: Halliday, et al., (2006). p.898

패턴 5-2. 시각 이론에서의 케플러(J. Kepler)의 연속적 문제 발견

당시 과학사적 상황

고대로부터 사람들은 ‘사람은 어떻게 물체를 보는가?’에 대해서 의문을 품어왔다. 아리스토텔레스 이전에는 사람의 눈에서 빛이 나와서 물체를 본다고 설명하기도 했다. 아리스토텔레스 이후에는 물체에서 반사된 빛이 우리 눈에 들어와 물체를 보게 된다고 설명하게 되는데, 물체의 상이 어디에 어떻게 맺히는가에 대해서는 알하젠(Alhazen; 이슬람식 이름은 Ibn al-Haythem)의 이론을 이어받은 비텔로(Witelo)의 이론이 지배적이었다.

케플러의 문제 인식

케플러(J. Kepler)는 화성의 궤도 운동을 관측하면서 ‘사람은 어떻게 물체를 보는가?’에 대해 의구심을 갖고 문헌을 분석하였다(Ferguson, 2002). 그는 광학의 관점에서 그 당시 비텔로의 시각에 관한 설명을 분석하기 시작하였는데, 왜냐하면 비텔로는 중세 학자인 알하젠의 이론에 크게 의존하여 시각에 관한 책을 완성하였으며, 그 책이 그 당시에는 광학에 관한 가장 종합적인 저술이었기 때문이다(Crombie, 1990; Wade, 1998). 그런데, 케플러는 그 책에서 비텔로가 시각 상(visual image)에 대한 광학적 분석을 생략했다는 것을 발견하였으며 스스로 광학적 분석을 시도하였다(Wade, 1998). 이 분석이 케플러로 하여금 비텔로 및 그 이전 학자들의 이론이 잘못되었다는 것을

발견하는 계기가 된다(Ferguson, 2002).

알하젠은 [Fig. 8]과 같이 물체의 모든 점으로부터 광선들이 눈으로 보내지고 각막에 수직으로 만나 통과하여 수정체로 보내진다고 생각하였다. 그리고 수정체의 앞면에 수직으로 들어오는 광선들만 감각되어 물체의 각 점들에 대응하는 점들로 구성된 상을 생성하게 된다고 설명하였다(Lindberg, 1976, pp.82-85). 그리고 그는 도립상이 생기는 것을 받아들일 수 없었기 때문에, 곡률 중심으로 향하던 광선들이 교차되기 전에 수정체 뒷면에서 각각이 서로 멀어지도록 굴절하여 교차하지 않고 감각 신경에 도달한다고 생각했다(Crombie, 1990; Lindberg, 1976).

케플러는 비텔로의 시각에 관한 설명을 분석하였다. 그는 투명한 구 앞에 작은 구멍을 놓음으로써 시각과 비슷한 환경을 만들었다. 그의 광학적 분석은 [Fig. 9]와 같다. 이 분석에 의하면 스크린 kl에는 hi에 있는 물체의 도립상이 맺힌다는 것이 명백하다(Crombie, 1990).

문제의 형성

케플러의 광학적 분석은 그들의 시각에 관한 설명이 광학적으로 불가능함을 보여주었으며, 그에게 중요한 과학적 문제를 발견하고 정의하게 하는 계기가 되었다. 케플러는 그 설명 속에 광학적 분석이 생략되어 있음을 발견하였고, 엄격한 계산과 시범으로 그들의 설명이 잘못되었음을 밝혀냈다. 그 분석을 마친 후에 케플러는 그들의 이론으로부터 떠나게 된다(Crombie, 1990). 그러므로 이제 ‘사람의 눈이 어떻게 물체를 보게 되는가, 그리고 상의 위치는 어디인가?’ 하는 문제는 다시 해결해야 할 새로운 과학적 문제로 대두되었다.

문제의 해결

[Fig. 9]에서의 분석을 통해 케플러는 알하젠과는 180도 다른 방식으로 시각 과정을 설명하는 새로운 시각 이론을 세우게 된다. 즉, [Fig. 10]에서와 같이 물체의 모든 점에서 많은 빛이 반사된 다음 그 빛이 망막의 대응되는 각 점에 모여 상을 맺으며, 상의 위치는 망막이며, 망막에 도립상이 생긴다는 것이다.

새로운 문제의 제기

케플러는 위에서와 같은 시각 이론을 세운 다음, 다

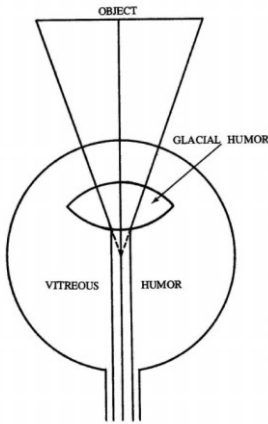


Fig. 8 Alhazen's idea of vision source: Lindberg (1976), p.82

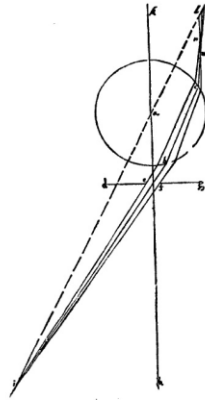


Fig. 9 Kepler's optical analysis source: Crombie (1990), p.301

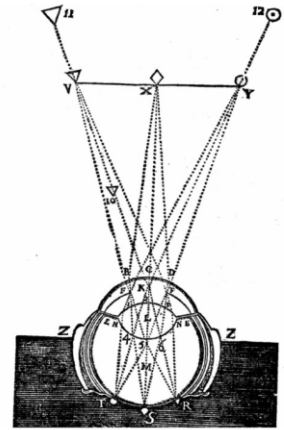


Fig. 10 Kepler's new idea of vision source: Kim (2006), p.840

음과 같은 연구 문제를 새롭게 발견했다. 즉, '망막은 평면적이다. 그런데 우리는 어떻게 물체를 지각할 때 입체적으로 지각하는가?' 이다.

IV. 결론 및 제언

과학 창의성은 학생들이 새로운 과학 아이디어를 만들어 내는 능력을 발휘할 때 나타난다(Feldhusen & Treffinger, 1985). 과학적 문제 발견은 새로운 아이디어를 만들어내는 과정이며 과학 창의성에서 중요한 요소이다. 따라서 과학적 문제 발견은 학교 과학교육에서 창의성 계발의 과정으로 지도되어야 할 것이다. 학생들의 과학적 문제 발견 능력을 길러주기 위해서는, 지금까지 과학자들이 어떻게 문제를 발견해 왔는가를 분석하고 이를 과학수업에서 활용할 필요가 있다. 본 연구에서는 창의적 과학자들이 문제를 발견하는 과정에서 나타내는 패턴을 분석하였으며 다음과 같은 5가지 패턴을 발견하였다. 패턴 1은 과학자들이 당시의 이론이나 설명이 불충분하거나 모순 또는 오류를 발견함에 의해 과학적 문제를 발견하는 경우이다. 패턴 2는 과학자들이 당대의 지식으로는 설명되지 않는 이상한 현상을 관찰함에 의해 문제를 발견하는 경우이다. 패턴 3은 과학자들이 현상의 유사성과 비유사성 추론에 의해 문제를 발견하는 경우이다. 패턴 4는 과학자들이 새롭게 발명된 관찰 또는 측정 기구를 사용하여 새로운 현상을 관찰함으로써 문제를 발견하는 경우이다. 패턴 5는 과학자들이 연구 프로

젝트 수행 중에 그 연구와 관련된 새로운 문제를 발견하는 경우이다.

본 연구에서 대상으로 선정한 과학자 10명 외의 더 많은 과학자들의 사고 과정을 분석한다면 위에서 제시한 5가지 패턴 외에도 더 많은 패턴들을 찾을 수 있을 것이다. 그리고 이렇게 분석된 문제 발견의 패턴들은 학생들의 과학적 문제 발견 능력을 신장시키는 데 활용될 수 있을 것이다. 아주 단순한 방법으로는 과학자들이 문제를 발견한 과학사적 사례들을 의미 있게 구성하여 학생들에게 제시함으로써 과학적 발견이 어떻게 일어나는지에 대한 인식을 갖게 하는 것이다. 두 번째 방법은 문제를 발견할 수 있는 상황이나 시나리오를 제시하여 학생들로 하여금 실제로 문제 발견을 경험하게 하는 것이다. 예를 들면 케플러가 시각 이론 형성과정에서 경험한 상황을 학생들에게 제시하고 오류나 모순을 찾아 문제를 발견해 보도록 한다든지, 비유 추론에 의해 문제를 발견할 수 있는 상황들을 개발하여 제시하고 그 상황 가운데서 과학적 문제를 발견해 보게 하는 것 등을 시도해 볼 수 있다. 또 한 가지는 학생들이 수행할 수 있는 수준의 과학 프로젝트를 수행하게 한 다음, 그 수행 과정이나 프로젝트를 끝낸 다음에 그 프로젝트에서 수행한 과학적 활동이나 결과와 관련된 과학적 문제들을 제시해 보게 하는 것이다. 이러한 문제 발견 능력을 신장시키는 과학수업을 위해서는 과학적 문제 발견과 관련된 프로그램 개발이 필요한 것으로 고찰되었다.

국문 요약

우리나라 과학교육에서는 과학 창의성의 계발을 강조하고 있다. 본 연구에서는 과학 창의성으로서 과학자들의 문제 발견에서 나타나는 패턴을 탐색하는데 목적을 두었다. 사례별 당시의 과학사적 상황, 문제 발견의 과정 및 문제 해결에 대한 내용을 구체적으로 논의하였다. 연구 결과, 과학자 10명이 과학사적 사건을 발견할 때 특징적으로 나타내는 문제 발견의 패턴은 다음과 같은 5가지 패턴으로 발견되었다. 패턴 1의 경우는 당시의 이론이나 설명이 불충분하거나 모순 또는 오류를 발견함에 의해 과학적 문제를 발견하는 것으로, 여기에는 라부아지에, 멘델, 왓슨의 문제 발견이 포함되었다. 패턴 2의 경우는 당대의 지식으로는 설명되지 않는 이상한 현상을 관찰함에 의해 문제를 발견하는 것으로, 여기에는 러더퍼드와 윈트겐의 문제 발견이 포함되었다. 패턴 3의 경우는 비유 추론에 의해 문제를 발견하는 것으로, 카르노와 영의 문제 발견이 포함되었다. 패턴 4의 경우는 새롭게 발명된 관찰 또는 측정 기구를 사용하여 새로운 현상을 관찰함으로써 문제를 발견하는 것으로, 갈릴레이의 문제 발견이 포함되었다. 패턴 5의 경우는 연구 프로젝트 수행 중에 그 연구와 관련된 새로운 문제를 발견하는 것으로, 패러데이와 케플러의 문제 발견이 포함되었다.

주제어 : 문제 발견, 문제 발견 패턴, 과학 창의성, 과학사

참고 문헌

- Baily, C. (2013). Early atomic models - From mechanical to quantum (1904-1913). *European Physical Journal H*, 38, 1-38.
- Carnot, S. (1824). *Reflections on the motive power of fire*. In E. Mendosa (Ed.) (1988), *Sadi Carnot: Reflections on the Motive Power of Fire*. New York: Dover Publications, Inc.
- Cho, C. M. (1997). Discovery of oxygen. *Journal of Basic Science (Basic Science Research Institute, Sungshin Women's University)*, 15, 1-15.
- Cohen, I. B. (1985). *The birth of a new physics*. New York: W · W · Norton & Company.
- Crombie, A. C. (1990). *Science, optics and music in medieval and early modern thought*. London: The Hambledon Press.
- Drake, S. (1957). *Discoveries and opinions of Galileo*. New York: Doubleday Anchor Books.
- Einstein, A., & Infeld, L. (1938). *The evolution of physics*. New York: Simon & Schuster.
- Faraday, M. (2005). *Experimental researches in electricity*, vol III.1, London: Elibron Classics.
- Feldhusen, J. F., & Treffinger, D. J. (1985). *Creative thinking and problem solving in gifted education (3rd ed.)*. Dubuque, IA: Kendall/Hunt Publishing Company.
- Ferguson, K. (2002). *Tycho & Kepler*. New York: Walker & Company.
- Friedman, G., & Friedman, M. (1998). *Medicine's 10 greatest discoveries*. New Haven, CT: Yale University Press.
- Getzels, J. W. (1979). Problem finding: A theoretical note. *Cognitive Science*, 3, 167-172
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2006). *Fundamentals of physics (7th ed.)*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.
- Hartl, D., & Orel, V. (1992). What did Gregor Mendel think he discovered? *Genetics*, 131, 245-253.
- Henle, M. (1971). The snail beneath the shell. *Abraxas*, 1, 119-133.
- Hong, S. O. (1986). Research on the development of Michael Faraday's concept of lines of magnetic force. *Journal of the Korean History of Science Society*, 8(1), 48-70.
- Hudson, J. (1992). *The history of chemistry*. London: Macmillan Press Ltd.
- Iliffe, R., & Mandelbrote, S. (2013). *AHRC Newton Papers Project*. East Sussex: University of Sussex.
- Im, G. S. (2001). *Pioneers of modern physics*. Seoul: Dasan Publishing Co.
- Jonassen, D. H. (2011). *Learning to solve problems: A handbook for designing problem-solving learning environments*. New York: Routledge.
- Kevles, B. H. (1996). *Naked to the bone medical imaging in the twentieth century*. Camden, NJ: Rutgers University Press.
- Kim, H. S. (1988). Lavoisier's combustion theory. *Physics Education*, 16(1), 44-49.
- Kim, Y. (2006). Kepler's scientific problem finding and the abductive reasoning in his discovery of the retinal image formation. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 26(7), 835-842
- Kim, Y. (2010). *Abductive Reasoning and Creativity in Physics and Physics Education*. *Sae Mulli*, 60(7), 689-701.
- Kragh, H. (2010). *Before Bohr: Theories of atomic structure 1850-1913. Reposs #10*, University of Aarhus, Denmark.
- Klug, A. (1968). *Rosalind Franklin and the discovery of the*

- structure of DNA. *Nature*, 219, 808-810, +843.
- Langley, P., Simon, H., Bradshaw, G., & Zytkow, J. (1987). *Scientific discovery: Computational explorations of the creative processes*. Cambridge: MIT Press.
- Lee, P. L. (1997). Lavoisier's oxidation theory. *Science Thoughts* (Byumyang Publishing Ltd.), 20, 137-146.
- Lindberg, D. C. (1976). *Theories of vision from al-Kindi to Kepler*. Chicago: University of Chicago Press.
- Mason, S. F. (1962). *A History of the Sciences*. NY: Collier Books.
- McCormack, A. J., & Yager, R. E. (1989). A new taxonomy of science education. *Science Teacher*, 56 (2), 47-48.
- Meadows, J. (1987). *The great scientists*. New York: Oxford University Press.
- Mendel, G. (1909, 2008). *Experiments in plant hybridisation*. New York: Cosimo, Inc.
- MEST (Ministry of Education, Science, & Technology). (2011). *Science curriculum*. MEST Notification No. 2011-361, Supplement 9.
- Orel, V. (1996). *Gregor Mendel: The first geneticist*. London: Oxford University Press.
- Pauling, L., & Corey, R. B. (1953). A proposed structure for the nucleic acids. *PNAS*, 39(2), 84-97.
- Polanyi, M. (1958). *Personal Knowledge: "Towards a Post-Critical Philosophy"*. Chicago: University of Chicago Press.
- Russell, P., Wolfe, S., Hertz, P., & Starr, C. (2009). *Biology: The dynamic science*. Seoul: Life Science Publishing Co.
- Rutherford, E. (1906). *Radioactive transformations*. London: Constable & Co.
- Rutherford, E. (1911). The scattering of α - and β -articles and the structure of the atom. *Philosophical Magazine*, 21, 669-688.
- Stern, C., & Sherwood, E. (1966). *The origin of genetics: A Mendel source book*. San Francisco: W.H. Freeman.
- Thomson, J. J. (1904). On the structure of the atom: An investigation of the stability and periods of oscillation of a number of corpuscles arranged at equal intervals around the circumference of a circle. *Philosophical Magazine*, 7, 237-265.
- Wade, N. J. (1998). *A natural history of vision*. Cambridge: The MIT Press.
- Watson, J., & Crick, F. (1953). A structure for deoxyribose nucleic acid. *Nature*, 3(171), 737-738.
- Yang, J. S., & Koo, M. J. (2005). The changes in the view of life from the Mendelian genetics age to the biotechnology age. *Journal of the Korean History of Science Society*, 27(1), 87-107.
- Yoo, J. Y. (1990). Prestley and Lavoisier: Conservatism and progressivism in science thoughts. *Journal of the Korean History of Science Society*, 12(1), 158-165.
- Young, T. (1800). *Outlines of experiments and inquiries: Respecting sound and light*. In G. Peacock (1855), *Miscellaneous Works of the late Thomas Young*. London: John Murray. pp. 64-98.
- Young, T. (1804). Dr. Young's reply to the animadversions of the Edinburgh Reviewers, on some papers published in the *Philosophical Transaction*. In G. Peacock (1855), *Miscellaneous Works of the late Thomas Young*. London: John Murray. pp. 192-215.