

Kepler의 망막 상 이론 형성 과정에서의 과학적 문제 발견과 귀추적 사고

김영민

부산대학교

Kepler's Scientific Problem Finding and the Abductive Reasoning in his Discovery of the Retinal Image Formation

Kim, Youngmin

Pusan National University

Abstract: The aims of this study are to investigate how Kepler found a scientific problem for the retinal image theory and how abductive reasoning was used in his theory development, and to find implications for teaching creativity in science class from his thinking processes in the scientific discovery. Through the analysis of the related literatures, it was found that Kepler's problem finding in his retinal image theory came from the critical analysis of contemporary theories of vision, based on his relevant knowledge of optics, as he formulated his own hypothesis to build a new theory in eye vision employing optical phenomenon in spherical lens, which is a kind of abductive reasoning. From the results, three suggestions are proposed, that: (a) in the development of creativity teaching material, the situations like Kepler's problem finding need to be included in the programs; (b) it should be taught that relevant scientific knowledge is important for problem finding and hypothesis formulating; and (c) the experience of successful problem solving by themselves could help them find new scientific problem(s).

Key words: Kepler, problem finding, problem solving, abduction, abductive reasoning, hypothesis, retinal image, eye vision, optics, science education, physics education, creativity

I. 서론

과학에서의 창의성은 과학 영재교육과정뿐만 아니라 일반 과학교육과정에서도 주요 목표의 하나로 포함될 정도로 중요하게 여겨지고 있다 (McCormack & Yager, 1989). 그리고 이 창의성은 일반적으로 과학적 문제 해결의 한 형태로 설명되기도 한다 (Lanley *et al.*, 1987). 과학적 문제 해결의 과정은 때때로 문제가 잘 정의되어 주어지기도 하지만 일반적으로는 문제 발견으로부터 시작된다.

잘 정의된 문제에 대해 창의적인 해결을 생성하는 사람도 창의적으로 사고하는 사람에 속한다. 그렇지만, 만일 어떤 사람이든 과학적 문제를 발견하여 제시하지 못한다면 그의 창의적 재능은 발현될 수 없을 것이다. 즉, 문제를 발견하는 사람이 없이는 창의적

문제 해결도 없다는 것이다. 그렇기 때문에 Einstein & Infeld (1938, p.92)는 “문제의 형성은 종종 그 해결보다도 더 본질적이다. 문제 해결은 많은 경우 수학적적이고 실험적 기능이지만 새로운 질문을 던지고 새로운 가능성을 제기하고, 새로운 관점에서 과거 문제를 고려하는 것은 창의적인 상상력을 요하며 이것이 과학 진보에 실질적으로 기여한다.”라고 말함으로써 문제 발견의 중요성을 역설한 바 있다. Dillon (1982)에 의하면, 생산적 사고 연구의 대가인 Wertheimer 또한 사고의 기능은 주어진 문제의 해결보다는 문제를 발견하고 더 심도 깊은 질문을 찾아가는 것이라고 지적했으며, 생산적 질문을 발견하고 형성하는 것이 때로는 주어진 질문에 답하는 것보다 더욱 중요하고 더 큰 성취라고 주장했다. 이밖에도 Polya (1962), Subotnik & Steiner (1994), Starko (2000) 등도 문제

* 교신저자: 김영민(minkyoy@pusan.ac.kr)

** 2006.09.28(접수) 2006.10.09(1심통과) 2006.11.13(2심통과) 2006.12.05(최종통과)

발견은 문제 해결과 분명히 구분되며 그것이 문제 해결보다 더 중요하며 문제를 발견하고 형성하는 것이 창의적 사고의 핵심적 측면이라고 주장했다.

과학적 문제에 대한 잠정적 해답이라고 볼 수 있는 가설을 형성하는 것 또한 문제 발견 뒤에 일어나는 중요한 사고 과정이다. 가설을 형성하는 과정은 때때로 ‘케플러의 추측’(Szpiro, 2003)과 같이 단순한 추측(conjecture)으로 설명되기도 하지만, Peirce (1955)와 Hanson (1958)은 가설 형성은 귀추적 사고(abductive reasoning)라고 하는 논리적 사고 과정을 거치게 된다고 주장했다. 이들과 Lawson(2000)의 최근 해석에 따르면 귀추적 사고는 ‘현재의 현상을 이미 알려진 다른 상황에 유추하여 설명하는 추론 과정’으로 설명된다. Peirce (1955)는 “가설은 사실들 또는 그 일부를 설명하지 못하면 받아들여질 수 없다.”고 주장했으며, Hanson (1958)은 Peirce의 아이디어에 기초하여 귀추(abduction)란 관찰된 현상에 대한 설명을 창조하는 과정이라고 주장했다. Lawson (2002)은 ‘오븐 속의 바비큐가 더 이상 익지 않는’ 이유를 추론하는 과정의 예를 들어 더 구체적으로 귀추적 사고를 설명하기도 했다. 최근에는 좀더 상세한 과정을 연구하여 Park and Kim은 가설 생성 과정을 현상의 관찰, 인과적 질문 제기, 가설의 탐색, 가설의 제안으로 설명하였으며(박종원, 2003), 권유주 등(2003)은 귀추적 과정을 의문 생성으로부터 의문 상황 분석, 경험 상황 동정, 원인적 설명자 동정, 가설적 설명자 고안의 과정을 거치는 것으로 설명하였으며, 정진수 등(2005)은 가설 생성 과정을 삼원귀추모형(Triple Abduction Model)으로 설명하고 이를 고등학생들에게 적용하는 연구를 수행한 바 있다. 그런가 하면, 오필석, 김찬중(2005)은 귀추적 방법을 지구과학 탐구의 한 방법으로 보고 귀추적 탐구 모형을 제시하기도 하였다.

과거든 현재든 창의적인 과학자들은 끊임없이 과학적 문제를 발견하고 그 해결을 위한 노력을 계속해 왔다. 그 과정에서 어떤 과학자는 과학적 문제를 발견하고 제기하였으나 자신이 그 문제를 해결하지는 못했으며, 어떤 과학자는 다른 과학자가 제기한 과학적 문제를 해결하였으며, 어떤 과학자는 자신이 발견하고 형성한 문제를 스스로 해결하기도 하였다. 예를 들면, Galileo는 ‘빛의 속도는 도대체 얼마인가?’라는 과학적 문제를 제기했지만 그 자신이 그 문제를 해결하지는 못했으며 (Einstein & Infeld, 1938), Hertz는 Maxwell에 의해 예측된 전자기파의 존재 문제를 해결하였다. 그런가 하면, Kepler는 옛날 이론 속에 숨어 있는 시각 이미지의 오류 문제를 발견하였고 스스로 그 문제를 해결하였다 (Crombie, 1990).

우리가 창의적인 과학자들이 어떻게 과학적 문제를 발견하였고 그 문제 해결을 위해 어떻게 가설을 형성했는가를 이해한다면, 과학적 문제 발견의 패턴을 찾을 수 있고, 앞에서 제기된 가설 형성의 과정에 대한 과학사적 증거를 찾을 수 있을 것이다. 또, 이것은 학생들의 과학적 창의성 개발을 위한 프로그램 개발의 방향을 설정하는데 그리고 창의성 교육의 이론적 기초를 형성하는 데에 기여할 수 있을 것이다. 그렇기 때문에 과학적 창의성의 목표를 달성하기를 희망하는 교사나 교육과정 개발자들은 창의적 과학자들이 그들의 발견 과정에서 어떻게 사고하는가를 알아보고 싶어 한다.

망막 상 형성에 대한 Kepler의 발견은 과학사적으로 중요한 과학적 문제 발견 및 이론 형성 중 하나이다. 그리고 문제 발견으로부터 그 문제 해결을 위한 가설 형성 과정이 비교적 짧았고 그 자신의 논문을 포함하여 관련 문헌들이 비교적 풍부하기 때문에 그의 사고 과정이나 패턴이 좀더 명확하게 분석될 수 있다.

그러므로 이 논문에서는 시각에 의한 상의 위치가 망막이라는 것을 발견한 Kepler가 어떻게 과학적 문제를 발견하였으며 어떻게 문제 해결을 위한 가설을 형성하였는가를 조사하고 분석해 보았다. 그리고 그것이 귀추적 사고와는 어떻게 연결되는지를 분석하였으며, 그 결과로부터 과학 창의성 교육에서 문제 발견 및 가설 형성 수업을 위한 시사점을 도출하였다.

이 연구는 Kepler가 시각 이론 형성 과정에서 과학적 문제를 발견하고 과학적 가설을 형성하는 과정을 분석하는 것이 목적이므로 이 연구 문제와 관련된 Kepler의 원전과 Kepler의 시각 이론 형성 과정을 과학사적으로 기술한 2차 자료를 분석하는 문헌 연구의 방법으로 수행되었다. 본 연구에서 주로 분석한 문헌들은 다음과 같다: Kepler, J., 1990; Crombie, A. C., 1990; Ferguson, K., 2002; Lindberg, D. C., 1976; Wade, N. J., 1998.

II. 시각 이론(eye vision theory)에 대한 Kepler의 과학적 문제 발견

Kepler가 망막 상 이론을 발견했을 때, 그는 ‘The Optical Part of Astronomy’와 ‘Commentaries of the Theory of Mars’ 라고 하는 두 권의 책을 집필하는데 몰두해 있었으며, 그는 그 집필을 위해 광학에 대한 여러 문헌들을 참고하기 시작했고, 인간의 눈의 기능을 탐구할 필요를 느꼈다 (Ferguson, 2002). 그는 광학의 관점에서 그 당시 Wittelo의 시각에 관한 설

명을 분석하기 시작하였는데, 왜냐하면 Wittelo는 중세 학자인 Alhazen의 이론에 크게 의존하여 시각에 관한 책을 완성하였으며, 그 책이 그 당시에는 광학에 관한 가장 종합적인 저술이었기 때문이다 (Wade, 1998; Crombie, 1990). 그런데, Kepler는 그 책에서 Wittelo가 시각 상(visual image)에 대한 광학적 분석을 생략했다는 것을 발견하였으며 스스로 광학적 분석을 시도하였다 (Wade, 1998). 이 분석이 Kepler로 하여금 Wittelo 및 그 이전 학자들의 이론이 잘못되었다는 것을 발견하는 계기가 된다 (Ferguson, 2002). 그러면, 시각 상에 대한 Alhazen과 Wittelo의 설명은 무엇이었으며, 그 이론에는 무슨 문제가 있었는가?

1. Kepler 이전의 시각 이론들

Alhazen(이슬람식 이름은 Ibn al-Haytham)은 시각은 물체로부터 보내진 빛에 의해 유발된다는 이론을 받아들였다. 눈의 감각 부분인 수정체(그 당시에는 glacial humor 라고 함)는 단지 그것에 수직으로 들어오는 빛에 대해서만 반응하여, 눈의 중심이 꼭지점이 되고 시각 세계(visual field)가 밑면이 되는 원추를 형성한다고 설명하였다 (Crombie, 1990; Lindberg, 1976). 수정체에 상이 생긴다고 믿었던 Galen을 따르고, Euclid에 의해 세워진 기하 광학과 Ptolemy의 원추를 조합하여 그는 시각의 메카니즘에 대한 분석을 시도하였다. 그는 Fig. 1과 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). 그러나 그는 도립 상이 생기는 것을 받아들일 수 없었기 때문에, 곡률 중심으로 향하던 광선들이 교차되기 전에 수정체 뒤면에서 각각이 서로 멀어지도록 굴절하여 교차하지 않고 감각 신경에 도달한다고 생각했다. 그러나 문제는 이미 Ptolemy가 소한 매질에서 밀한 매질로 경계면에 비스듬히 입사하는 광선들은 경계면에 그은 법선 쪽으로 굴절하며, 밀한 매질에서 소한 매질로 입사하는 광선들은 법선에서 멀어지는 방향으로 굴절한다는 것을 증명했다는 것이다. 그래서 그는 그가 요구하는 방향으로 광선들이 굴절하도록 하기 위해, 수정체가 유리액보다 광학적으로 더 소한 매질이라고 가정해야만 했다 (Crombie, 1990; Lindberg, 1976).

16세기에는 Wittelo가 Alhazen의 이론을 대부분 받아들여 그것을 기초로 책을 집필하였으며, 1572년에 출판하였다. 그러므로 본질적으로 그 책 속의 이론들

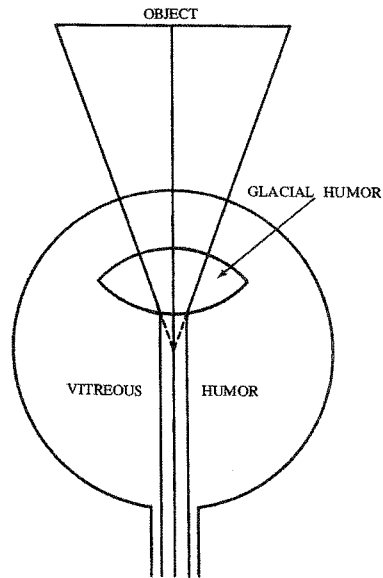


Fig. 1 Alhazen's idea of vision (Diagram from Lindberg (1976, p.82))

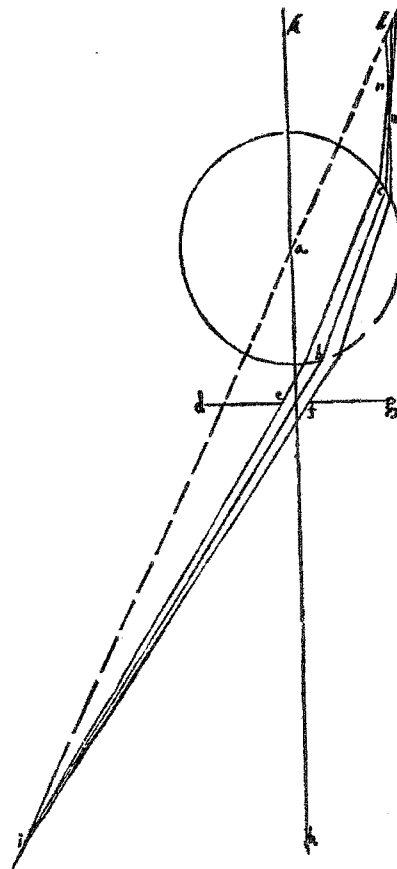


Fig. 2 Kepler's optical analysis about Wittelo's vision theory (From Kepler, *De Modo Visionis*, Crombie (trans), 1990, p. 301)

은 Alhazen의 이론들이라고 볼 수 있다 (Wade, 1998; Crombie, 1990).

2. Wittelo 설명에 대한 Kepler의 분석과 과학적 문제 발견

위에서 언급한 바와 같이, Kepler는 그 자신의 필요에 의해서 Wittelo의 시각에 관한 설명을 분석하였다. Kepler는 투명한 구 앞에 작은 구멍을 놓음으로써 시각과 비슷한 환경을 만들었다. 그의 광학적 분석은 Fig. 2와 같다.

Fig. 2에서 a 점은 구의 중심이고 ef는 그 앞에 놓은 작은 구멍이다. hi에 물체를 놓고, kl 위치에 스크린을 놓으면, i로부터 보내지는 광선들은 작은 구멍을 통과하여 mn 범위에 모이게 된다. 가리개와 작은 구멍이 없다면, i의 가장 강한 상은 mn 범위보다는 l 위치에 생길 것이다. 그러나 가리개가 구의 중심으로 향하는 빛들을 막기 때문에 작은 구멍으로 향하는 빛들이 구에 가까운 쪽에 선명한 상을 생성하게 된다. 그리고 l에는 약간 희미한 상이 생기게 될 것이다. h로부터 오는 광선들은 구의 중심부를 통과하여 k 위치에 비교적 선명한 상을 생성하게 된다. 이 시범으로부터 스크린 kl에는 hi에 있는 물체의 도립상이 맺힌다는 것이 명백하다 (Crombie, 1990).

이 분석에 따르면, 상의 위치는 수정체의 앞면이 될 수가 없다. Kepler는 이러한 광학적 실험 결과와 분석을 믿었기 때문에, 광학적 분석 결과와 일치하지 않는 Alhazen과 Wittelo의 시각 이론에 대해 의심을 갖게 된다. 그들의 이론이 그 당시 폭넓게 받아들여지고 있었지만 실제적인 실험 결과를 더 인정한 것이다. 이러한 광학적 분석은 그들의 시각에 관한 설명이 광학적으로 불가능함을 보여주었으며, 그에게 중요한 과학적 문제를 발견하고 정의하게 하는 계기가 되었다. 즉, Alhazen과 Wittelo의 시각 이론은 광학적 분석을 생략한 불완전한 설명이며 도립 상이 생길 수 없다는 그들 자신의 생각에 맞춰 추론된 잘못된 설명이었다. 그렇기 때문에 그들의 설명 속에는 광학적 불가능성이 내재되어 있었다. 그러나 Kepler는 그 설명 속에 광학적 분석이 생략되어 있음을 발견하였고, 엄격한 계산과 시범으로 그들의 설명이 잘못되었음을 밝혀냈다. 그 분석을 마친 후에 Kepler는 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.

이상의 분석으로부터 Kepler가 과학적 문제를 발견

하고 정의하는 사고 과정은 Fig. 3과 같이 정리될 수 있다.

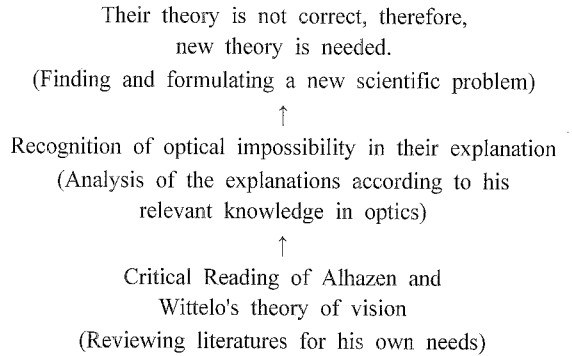


Fig. 3 Kepler's thinking process in his problem finding

Kepler가 발견한 과학적 문제는 Getzels (1987)가 분류한 문제 유형에 의하면 이미 잘 정의되어 있는 문제가 아니라 발견된 문제(discovered problem) 유형에 속하며, Dillon(1982)의 분류에 따르면 외연적으로 드러나 있는 문제가 아니라 내재적으로 잠재되어 있는 잠재적인 문제(potential problem) 유형에 속한다고 볼 수 있다.

III. 시각에 대한 가설 형성에서 나타난 Kepler의 귀추적 사고

Kepler는 새로운 시각 이론을 세우기 위해 노력하게 된다 (Crombie, 1990). Kepler는 앞에서 보였던 투명한 구를 통과하는 광선들의 분석이 약간의 수정을 거치면 사람의 눈의 기작을 분석하는 데 적용할 수 있는 것으로 간주하였다. 수정체는 완전한 구형은 아니지만 안구의 앞면이 구형 또는 타원형이며 수정체의 뒷면은 쌍곡면이라고 생각했기 때문에 투명한 구에서의 광학적 분석이 적용되기에는 충분히 근사적인 구형이라고 보았다 (Lindberg, 1976, pp. 193-194).

Kepler는 물체에서 반사된 빛이 투명한 구를 통과하여 스크린에 상을 맺는 현상을 물체의 상이 인간의 눈을 통과하여 망막에 맺히는 현상을 설명하는 데 도입하게 된다. 우선 그는 물체의 어떤 점에서도 수많은 직선의 빛 흐름이 있으며, 무한대까지 진행하고, 이렇게 방출되는 빛들이 광선으로 불린다고 생각했다 (Wade, 1998; Kepler, 1990). 그리고 물체의 각 점에서 반사되어 눈으로 들어오는 광선들이 각막 전체와 동공을 통과하고, 물체의 각 점이 꼭지점이 되고 동공이 밑면이 되는 원추를 형성한다고 생각했다(이러한 Kepler의 생각은 물체가 밑면의 일부가 되고 안구 중

심이 꼭지점이 되어 원추를 형성한다고 설명한 Alhazen 및 Wittelo의 생각과는 정 반대되는 것이었다). 눈으로 들어온 광선들은 약간씩 굴절하여 수정체 표면으로 들어오게 된다. Kepler는 그의 책 *De Mono Visionibus* (Crombie 역, 1990)에서 그 과정을 다음과 같이 설명하였다. “각막과 그 바로 밑의 액체는 공기보다 밀하기 때문에 물체의 한 점에서 각막에 비스듬히 보내진 광선들은 법선 쪽으로 굴절한다. 그러므로, 처음에 공기 중으로 퍼져나간 광선들은 동공으로 수렴하고, 이 광선들은 동공에 도달하기 전에 있는 밀한 액체를 통과하면서 비교적 크게 굴절하여 동공에 도달한 다음, 더 진행하여 수정체의 표면으로 들어가게 된다.” 이렇게 물체의 각 점들은 유사한 원추를 형성하게 되는데, 모든 원추들은 동공에서 교차하여, 왼쪽 점에서 온 광선들은 오른쪽으로, 위의 점에서 온 광선들은 아래쪽으로 진행하게 된다 (Lindberg, 1976, p. 193). 이것이 그의 빛 이론에 기초한 망막 상 형성 과정이며, 이 이론은 현대 시각 이론의 기초가 되었다.

이 사고의 과정을 분석해 보면 Fig. 4와 같으며, 여기서 보인 것과 같이 Kepler는 구형 렌즈에서 나타나는 현상(과거 경험)을 도입하여 시각 이론의 가설을 형성했음을 알 수 있다. Peirce(1955)와 Hanson (1958)에 따르면 이러한 사고 과정은 귀추적 사고 과정의 하나로 볼 수 있다.

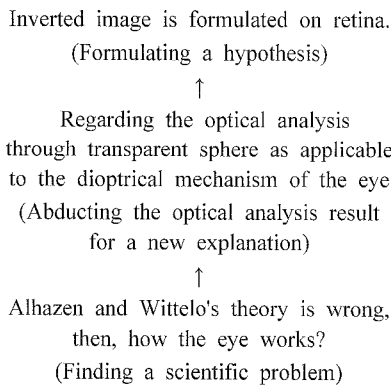


Fig. 4 Kepler's abduction in formulating hypothesis of retinal image formation

시각 이론에 대한 그의 가설을 형성하는 동안 Kepler는 Wittelo와 Alhazen 외에도 광학과 시각에 대한 여러 다른 학자들의 생각을 분석하고 차용하였다. 주로 해부학자나 의학자의 분석을 인용하였는데, 눈의 해부학에 대해서는 주로 1583년에 출판된 해부학자 Plater의 연구 결과를 참조하였다고 한다. Plater는 상의 위치가 수정체가 아니라 망막이라고 주장하고, 시력이

약한 눈에 이용되는 돋보기처럼 망막 앞의 수정체가 물체를 크고 선명하게 볼 수 있게 한다고 설명했다. Kepler는 Plater의 시각 설명에 대해 다음과 같이 기술하고 있다: “시각의 기작에 대한 나의 설명과 Plater의 설명을 비교해 보라. 그러면, 이 사람이 수학을 잘 이용하는 의학자였다더라면 좀더 사실에 접근할 수 있었음을 알 수 있을 것이다.” (Crombie, 1990). Kepler가 인용한 또 다른 해부학 권위자는 Fabrici였으며, 그도 또한 눈의 구조에 대해 상세히 기술하고 있다. 그는 눈의 구조에 대해, 그리고 수정체의 모양에 대해 그때까지 출판된 것 중에서 가장 정확한 그림을 제시하였다. 그는 그가 본대로 수정체의 모양을 그림으로 제시하였다. 그러나 Fabrici는 여전히 수정체가 물체의 상이 맺히는 곳이라고 믿고 있었다. Kepler에 의해 인용된 또 다른 의학자는 Porta였는데, 그는 수정체가 상의 위치라는 생각을 가지고 있긴 했지만 그는 눈의 기작을 바늘구멍사진기(camera obscura)에 비유하여 눈의 동공(pupil)이 바늘구멍사진기의 바늘구멍처럼 작용하는 것으로, 그리고 수정체는 바늘구멍사진기에서 상이 맺히는 스크린처럼 작용하는 것으로 설명하였다. Kepler는 Porta의 설명을 인용하면서 “만일 그가 그의 설명에 도입된 상이 수정체에 의해서 망막에 맺힌다는 설명을 추가했다면, 그는 시각의 메카니즘을 분명하게 해결할 수 있었을 것이다”라고 아쉬워했다 (Crombie, 1990).

그런데 Kepler는 그의 시각 이론을 그림으로 나타내 보인 것이 없다. 그 후 30년 뒤에 쓴 Descartes의 저서 *La dioptrique*에 그림으로 보여진 것이 Kepler의 생각을 잘 묘사한 것으로 보여지며 그것은 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 보는 바와 같이, 물체 위의 점 V, X, Y에서 나오는 광선들은 각각이 각막 또는 수정체 앞면의 일부를 밑면으로 하는 원추를 형성한다. 각 밑면은 다시 안구 뒤쪽 즉, 망막의 한 점을 정점으로 하는 원추를 만든다. 이들 원추를 형성하는 광선들은 수정체를 지나 유리액으로 들어가면서 굴절되며, 정점 R, S, T로 수렴된다. 이 원추 쌍들은 동공에서 교차하여, 맨 왼쪽의 점 V로부터 온 광선들은 망막의 오른쪽에 있는 R점에 도달하고, 물체의 오른쪽에 있는 점 Y로부터 온 광선들은 망막 왼쪽에 있는 T점에 도달하며, 물체의 중심 부분인 X점에서 온 광선들은 망막의 중심인 S점에 도달한다. 이렇게 하여 망막에는 물체의 거꾸로 선 상이 맺히게 된다 (Lindberg, 1976)

이렇게 하여 Kepler는 그의 망막 상 이론의 결론을 맺게 된다. 물체로부터 수정체 표면으로 들어오는 광

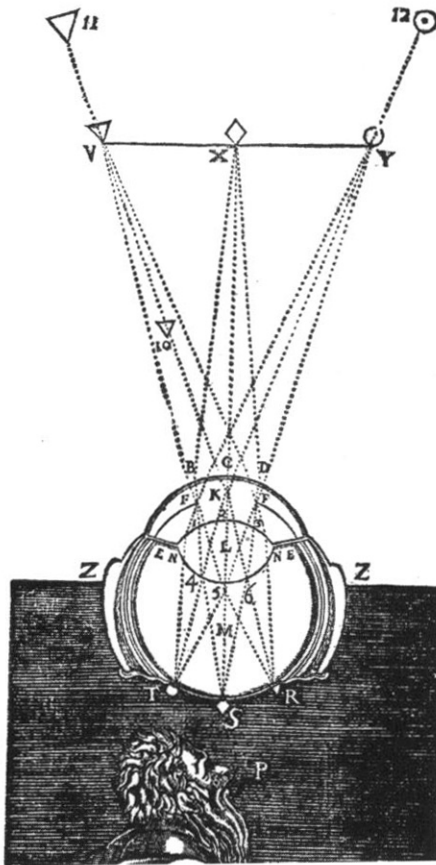


Fig. 5 Descartes's illusion of the theory of the retinal image (Lindberg, 1976, p. 193)

선들이 만드는 셀 수 없이 많은 원추들, 물체 위의 각 점이 꼭지점이 되고 수정체 표면이 공유 밑면이 되는 수없이 많은 원추들로 물체를 보게 되는 원리를 개념화하였다. 이것은 그때까지의 어떤 과학자도 생각해내지 못한 놀라운 도식이었다. 그래서 Straker는 Kepler가 그때까지 밑면이 물체에 있고 안구의 중심이 꼭지점이 되는 광선 원추 생각을 믿고 있었던 시각 이론가들의 생각을 반전시키는 급진적인 도약(radical step)을 보였다고 주장한다. Kepler가 도입한 원추형 복사에 대한 생각은 중세 과학자들도 분명히 가지고 있었지만 원추의 모양이 반전되어야 한다는 생각은 누구도 하지 못했던 것이다 (Lindberg, 1976).

광선에 대한 아이디어를 적용하면서, Kepler는 처음으로 바깥세상의 상이 안구 속의 수정체에 생기는 것이 아니라는 것을 깨달았다. Kepler는 물체의 상이 도립으로 망막에 맺힌다는 것을 발견했지만 그것을 우리가 어떻게 바로선 상으로 느끼는 것인지는 설명할 수 없었다 (Ferguson, 2002).

VI. 결론 및 과학교육에 주는 시사점

이러한 분석을 통해서 볼 때, 첫 번째 연구 문제에 대한 결론은, Kepler는 그의 광학에 대한 정확하고 적절한 지식을 바탕으로 하여 당대의 시각 이론에 대해 비판적으로 분석함으로써 과학적 문제를 발견하였다는 것이다. 그리고 두 번째 연구 문제에 대한 결론은, Kepler는 시각의 메카니즘에 대한 새로운 이론을 형성하기 위한 가설을 설정하는 과정에서 눈이 어떻게 작용하는가를 설명하기 위해 구면 렌즈에서의 광학적 현상을 도입하는 귀추적 사고(abductive reasoning)의 과정을 거쳤다는 것이다.

이러한 사실은 문제 기초 학습 (Problem Based Learning)이나 창의적 문제 해결 모델 (Creative Problem Solving Model)과 같은 창의성 교수 자료를 개발하는 데 있어서 시각 이론에서의 Kepler의 문제 발견과 같은 상황들이 현대적인 과학교육 상황에 맞도록 수정된 후 프로그램에 포함될 필요가 있으며, Kepler가 당시 시각 이론에서의 문제 발견과 가설 형성 과정에서 보였던 비판적 분석 활동을 교육 자료화 하여 학생들에게 주어질 필요가 있음을 시사해 준다.

과학 교육적 시사점을 좀더 구체적으로 설명하면, 첫째, 학생들로 하여금 증거의존적인 태도를 갖도록 하는데 케플러의 성공적인 가설 형성과 같은 과학사적 자료를 활용할 필요가 있다는 것이다. 눈의 작동에 대한 Kepler의 가설적 설명은 자신이 광학적으로 분석한 과학적 사실들에 대한 믿음에 기초하고 있다. 그 당시에도 비늘구멍사진기에서 보이는 현상 관찰을 통해 도립된 상이 발견되었지만 그것들은 Alhazen과 Wittelo의 설명에서 무시되거나 왜곡되었다. 그러나 Kepler는 그러한 광학적 사실들을 눈의 기작을 설명하는 데 사실로 받아들였다. 이것은 과학 교육에서 단순한 추측이나 직관, 자신의 생각에 의존한 관찰 결과 해석이 과학적 문제 해결의 저해 요인이 되는 한 가지 증거로 제시될 수 있다. 둘째로는, 케플러의 시각 이론에서의 가설 형성 과정을 교육자료화 함으로써 학생들로 하여금 어떤 과학적 문제 해결을 위한 가설들은 여러 가지로 세워질 수 있으며 그 가설들의 평가와 검증 과정을 통해 과학법칙이나 이론이 형성된다는 인식을 가지게 하는데 활용할 수 있다는 것이다. 예를 들면, Kepler 외에도 눈의 기작을 설명하려는 여러 가지 시도가 있었는데, Leonardo da Vinci는 공학적 접근 방식을 통해 눈의 메카니즘을 비늘구멍사진기의 메카니즘과 비교했으며, 유리 모형들을 만듦에 의해 눈의 부분 부분의 기능을 조사할 것을 제안하기

도 했다. 그러나 그는 도립상이 생기는 시각의 문제를 이해하지 못했다. 또, Maurolico는 렌즈들에 대해 상세히 연구했으나 그 또한 도립상이 생기는 시각의 문제를 이해하지 못했고, 오히려, 그는 수정체를 편평한 것으로, 앞면이 뒷면보다 더 편평한 것으로 기술하였으며, 그것의 작동에 대한 광학적 분석을 시도하였다 (Crombie, 1990). 이러한 예들을 함께 소개함으로써 학생들로 하여금 하나의 과학적 발견을 위해 여러 가지 가설 형성과 검증 과정을 거쳤다는 것을 이해시킬 수 있다. 끝으로, 학생들 스스로 과학적 문제 해결에 대한 경험을 가지게 함으로써, 그 과정에서 새로운 과학적 문제들을 발견할 수 있도록 하는 학습 자료를 개발할 필요가 있다. 이것은 Kepler의 경험으로부터도 그 예를 찾을 수 있는데, 그는 시각 이론의 문제를 성공적으로 해결한 후에 ‘이차원적인 망막 상으로 우리는 어떻게 3차원적으로 세계를 인식하는가?’라는 새로운 문제를 제기하였다 (Wade, 1998).

국문 요약

이 연구의 목적은 시각에서의 망막 상 이론을 세우는 데 있어 Kepler가 어떻게 과학적 문제를 발견하고 그의 이론 형성 과정에서 어떻게 귀추적 사고를 하였는가를 조사하고, 그 분석 결과를 통해 과학에서의 창의성 교육을 위한 시사점을 얻는 것이었다. 관련 문헌들의 심층적인 분석을 통해, Kepler의 망막 상 이론에서의 과학적 문제 발견은 당시 시각 이론에 대한, 그의 정확하고 적절한 광학적 지식을 바탕으로 한 비판적 분석으로부터 이루어졌으며, 그는 새로운 이론을 세우는 과정에서 이미 알고 있는 구면 렌즈에서의 광학적 현상을 눈의 메카니즘 설명에 도입함으로써 귀추적 사고의 과정을 거쳤음이 밝혀졌다.

이러한 결과들로부터 과학 창의성 교육을 위한 시사점이 다음과 같이 도출되었다. 첫째는, 과학 창의성 교수 자료의 개발에 있어서 프로그램 속에 Kepler의 과학적 문제 발견과 같은 상황이 제시될 필요가 있다는 것이며, 둘째로는, 적절하고 정확한 과학적 지식이 과학적 문제를 발견하고 가설을 형성하는 데 있어 필수적이라는 것이 지도되어야 하고, 마지막으로, 학생 스스로 성공적인 문제 해결 경험을 가질 수 있도록 하고, 그것이 그들로 하여금 새로운 과학적 문제를 발견하는 데까지 이르도록 프로그램을 구성해야 한다는 것이다.

주제어: 케플러, 문제 발견, 문제 해결, 귀추, 귀추적 사고, 가설, 망막 상, 시각, 광학, 과학교육, 물리교육, 창의성

참고 문헌

- 권용주, 정진수, 박윤복, 강민정 (2003). 선언적 과학 지식의 생성 과정에 대한 과학철학적 연구. *한국과학교육학회지*, 23(3), 215-228.
- 박종원 (2003). 과학적 가설 검증을 위한 학생들의 실험 설계 내용 분석. *한국과학교육학회지*, 23(2), 200-213.
- 오필석, 김찬중 (2005). 지구과학의 한 탐구 방법으로서 귀추법에 대한 이론적 고찰. *한국과학교육학회지*, 25(5), 610-623.
- 정진수, 원희정, 권용주 (2005). 과학적 가설의 생성력 향상을 위한 삼원귀추모형의 적용. *한국과학교육학회지* 25(5), 595-602.
- Crombie, A. C. (1969). *The history of science from Augustine to Galileo*. New York: Dover Publications.
- Crombie, A. C. (1990). *Science, optics and music in medieval and early modern thought*. London: The Hambledon Press.
- Dillon, J. T. (1982). Problem finding and solving. *Journal of Creative Behavior* 16, 97-111.
- Einstein, A., & Infeld, L. (1938). *The Evolution of physics*. New York: Simon & Schuster.
- Ferguson, K. (2002). *Tycho & Kepler*. New York: Walker & Company.
- Getzels, J. W. (1987). Problem finding and creative achievement. *Gifted Students Institute Quarterly*, 12(4), B1-B4.
- Gross, C. G. (1999). The fire that comes from the eye. *The Neuroscientist* 5(1), 58-64 .
- Hanson, N. R. (1958). *Patterns of discovery*. Cambridge: Cambridge University Press. (송진웅, 조숙경 역 (1995). *과학적 발견의 패턴*)
- Kepler, J. (1990). *De Modo Visionis*, translated by A. C. Crombie. London: The Hambledon Press.
- Langley, P., Simon, H., Bradshaw, G., & Zytkow, J. (1987). *Scientific discovery: computational explorations of the creative processes*. Cambridge: MIT Press.
- Lawson, A. E. (2000). How do humans acquire knowledge? and What does that imply about the nature of knowledge?. *Science & Education*, 9, 577-598.
- Lawson, A. E. (2002). What does Galileo's discovery of Jupiter's moons tell us about the process of scientific discovery?. *Science & Education*, 11, 1-24.
- Lindberg, D. C. (1976). *Theories of vision from al-Kindi to Kepler*. Chicago: University of Chicago Press.
- McCormack, A. J., & Yager, R. E. (1989). A new taxonomy of science education. *Science Teacher*, 56 (2), 47-48.
- Peirce, C. S. (1955). Abduction and induction. In J.

Buchler (Ed.), *Philosophical writings of Peirce*. New York: Dover Publishers.

Plato (1965). *Timaeus and Critias*, translated by D. Lee. London: Penguin Books.

Polya, G. (1962). *Mathematical discovery: On understanding, learning, and teaching problem solving* (Volume I, pp. 117-128). New York: John Wiley & Sons.

Starko, A. J. (2000). Finding the problem finders: Problem finders and the identification and development of talent. In R. C. Friedman, & B. M. Shore (Eds.), *Talents unfolding: cognition and development*. American Psychological Association.

Subotnik, R. F., & Steiner, C. L. (1994). Problem identification in academic research: A longitudinal case from adolescence to early adulthood. In M. A. Runco (Ed.), *Problem finding, problem solving, and creativity*, (pp. 188-200). Norwood: Ablex Publishing Corporation.

Szpiro, G. G. (2003). *Kepler's conjecture*. New York: John Wiley & Sons.

Wade, N. J. (1998). *A natural history of Vision*. Cambridge: The MIT Press.