

Archimedes의 창의적 문제해결과정 분석을 통한 과학교육에의 함의 고찰

이상희 · 백성혜*

순천공업고등학교 · ¹한국교원대학교

Suggestion for Science Education through the Analysis of Archimedes' Creative Problem Solving Process

Lee, Sang Hui · Paik, Seoung Hey^{1*}

Suncheon Technical High School · ¹Korea National University

Abstract: In this study, we developed a model for analyzing scientists' creative thinking processes, and analyzed Archimedes' thinking process in solving the golden crown problem. As results show, scientists' complex problem solving processes could be represented as a repeating circular model, and the fusion of processes of diverse thinking required for scientists' creativity could be analyzed from the case. Also in this study, we represented the role of experiments in scientists' creative discovery, and investigated the reasons for the difference between the viewpoints of textbooks and historic facts. We found the importance of abductive reasoning and advance knowledge in creative thinking. Archimedes solved the golden crown problem creatively by crossing the scientific thought of dynamics and the daily thought of baths. In this process, abductive reasoning and advance knowledge played an important role. Besides Archimedes' case, if we would reconstruct the creative discovery processes of diverse scientists' in textbooks, students could raise their creative thinking ability by experiencing these processes as educational steps.

Key words: creative thinking process, Archimedes' golden crown problem, abductive reasoning, advance knowledge, science education

I. 서 론

21세기에 필요한 인재는 가지고 있는 지식들을 조합하여 새로운 정보를 창출할 수 있는 지식 생산자이다. 이러한 인재를 기르기 위해 중요한 요소가 바로 '창의적 사고 과정'이다. 새로운 지식과 가치의 창출이 중시되는 사회에서 창의적 인재가 생산해 내는 아이디어는 개인, 기업, 국가의 경쟁력을 좌우하는 핵심 요소이기 때문이다. 창의성을 가지고 있느냐 아니냐의 여부가 그 사회의 생존 여부를 좌우한다는 Toynbee의 말처럼, 오늘날 창의성은 중요한 요소가 되었다. 이러한 사회적 요구에 따라 우리나라에서도 창의성 교육이 매우 강조되고 있으며, 2009 개정교육과정에서도 '기초 능력의 바탕 위에 새로운 발상과 도전으로 창의성을 발휘하는 사람을 키우는 것'을 목적으로 제시하였다.

Torrance (1988), Weisberg (2005) 등은 창의성을 '창의적 사고'라고 정의하였으며, 창의성을 발현하기 위해 '과정(Process)'에 초점을 두었다 (전경원, 2000). Hanson은 새로운 패러다임을 발견하는 창의적인 사람은 익숙한 사물로부터 지금까지 아무도 발견하지 못했던 것을 발견해 내는 사람이라고 하였다 (송진웅과 조숙경, 2007). Osborn (1953)은 그의 저서《상상의 공학(Applied Imagination)》과 《당신의 창의적인 능력(Your Creative Power)》에서 "새로운 아이디어란 거의 예외 없이 조합이나 발전적인 개량을 통해 다른 아이디어가 나오는 것이다. 즉, 새로운 아이디어라고 우리가 부르는 것은 낡은 아이디어에서 생겨나는 것"이라고 하였다 (전경원, 2000). 이상욱 (2010)은 과학적 창조성에서 기존 이론의 핵심을 정확하게 이해하고 비판적으로 분석할 수 있는 능력이 매우 중요하다고 하였다.

*교신저자: 백성혜(shpaik@knue.ac.kr)

**2012.08.06(접수) 2012.10.04(1심통과) 2013.01.02(2심통과) 2013.01.07(최종통과)

***이 연구는 2010년도 한국연구재단의 기초연구지원 인문사회지원사업(과제번호 B00554)의 연구비로 수행되었음.

창의성에 대한 정의는 학자에 따라 다양하지만, 그들의 창의성 개념에 대한 공통점은 새로움을 강조하고, 시대나 상황에 따른 적절성이 필요하다는 것이다 (노혜숙, 2003; Barron, 1988; Hennessey & Amabile, 1988; Ochse, 1990; Perkins & Salomon, 1988). 창의성에 관련된 많은 이론들 중 학교교육의 측면에서 가장 용이한 관점은 창의성을 인지적 과정으로 보는 것이다. 이 관점에서는 창의적 사고 과정을 문제해결의 한 형태로 본다 (Mumford, et al., 1991). 강순희 (2011)는 문제 해결로서의 과학적 사고력이 바로 과학교육에서 강조하는 과학 탐구 능력이라고 정의하였다.

문제 해결로서의 창의성 중 대표적인 이론은 Wallas (1926)가 Poncare의 아이디어를 받아들여 제안한 것으로, 준비, 부화, 조명, 검증의 네 단계이다 (김미선, 2009). Wallas의 이론은 창의적 과정이 선형적이라는 가정을 하고 있는데, 실제 창의적 문제 해결과정은 이러한 과정이 반복적이고 순환적으로 나타난다고 Lawson (1995)은 주장하였다.

그러나 학교교육에서 학생들의 창의적 사고를 효과적으로 지도하기 위한 교수 방법과 교육 환경에 대한 이해는 매우 부족한 실정이다. 초등학교 중학년의 과학 수업을 대상으로 한 연구(이경화 등, 2009)에서 창의성 교육은 특정 교수기법에만 중심을 둔 형태로 진행되고 있다고 지적하였으며, 학교에서 창의성을 신장시키고자 하는 활동이 전체 수업활동에서 차지하는 비율은 극히 낮은 것으로 나타났다 (이경화와 최병연, 2006). 현재 보편적으로 이루어지는 과학수업을 통해서 스스로 문제를 파악하고 새로운 질문을 던져보는 고차원적인 사고능력과 창의성을 기르기는 어렵다 (조한혜정, 2009).

과학 교육에서 제시하는 과학은 과학적 발견이 이루어진 과정을 생략하고 있으며, 결과인 지식만을 부각시키고, 그 지식의 전달만을 강조하는 수업으로 이루어져 있다. 그러나 창의적 사고과정을 가르치기 위해서는 결과보다 결과가 나오기까지의 사고 과정을 이해할 수 있도록 지도하는 것이 필요하다. 과학 지식의 생성에 중심을 둔 효과적인 교수 전략은 학생들이 과학자의 연구과정을 학습 상황에서 직접 경험할 수 있도록 하는 것이다 (양일호 등, 2006). Harwood (2004)는 학생들에게 과학자와 같이 사고하고 새로운 지식 발견의 기쁨을 누리게 하려면 실제 과학자들이

자신의 연구실에서 자연을 대상으로 지식을 생성하는 과정을 직접 관찰하여 분석하는 연구가 선행되어야 한다고 주장했으며, 강성주 등 (2009), 이선길 (2006), Dunbar (2000)도 과학자가 그들의 연구를 수행하는 과정에서 이루어지는 사고를 이해하는 것이 과학 교육에서 중요하다고 주장하였다. 가장 창조적이었던 사람들이 생각하고 행동한 방식을 따라서 열심히 노력하면, 그렇지 않았을 때보다 더 창조적이 될 수 있기 때문이다 (홍성욱, 2003). 이러한 맥락에서 최근 창의적 인재를 키우기 위한 노력으로 과학자들의 창의성이 주목받고 있다 (문만용, 2009).

따라서 이 연구에서는 과학 교과에서 다루는 창의적 성과를 낸 과학자를 선정하여 그가 어떻게 창의적 결과에 도달할 수 있었는지 여러 가지 문헌을 통해 유추해 보고, 교과서의 내용과 과학자의 창의적인 사고 과정 사이를 연결해주는 해석의 시각을 제시하고자 한다. 이를 위하여 Archimedes의 ‘왕관문제’를 선정하였으며, 그가 창의적으로 문제를 발견하고 해결하는 과정을 구체적 사례 중심으로 분석하고 과학교육에 주는 함의를 고찰해 보고자 한다.

II. 연구방법

1. 과학자 선정 및 관련 자료 분석

과학적 발견을 연구하는 방법에는 과학자의 과학적 사고 과정을 장기간에 걸쳐 관찰하는 방법 (Observations of Ongoing Discovery), 과학자의 저술을 분석하는 역사적 기술 (Historical Accounts)방법, 통제된 조건 하에서 실험을 설계한 상황에서 문제해결과정을 관찰하는 실험실 연구 (Laboratory Studies), 과학자의 발견 과정을 컴퓨터 모델로 나타내는 방법 등이 있다 (Klahr & Simon, 1999).

이 연구에서는 역사적 기술 방법을 이용하여 과학 교육과정에서 창의적인 성과를 낸 의미 있는 과학자인 Archimedes와 관련한 문헌을 조사하고, 그의 창의적인 문제 해결 과정에 대해 알아보려 한다. Archimedes는 헬레니즘 시대의 전성기인 기원전 3세기에 활동한 그리스의 수학자이자 과학자이다. Archimedes의 연구는 매우 제한된 수학적 도구만을 가지고 놀라울 정도로 깊은 수준의 결과들에 도달했다는 점에서 중등학교 교육과정에 큰 시사점을 준다

(홍갑주, 2008). 그는 지식들을 창의적이고 치밀하게 조합하여 결코 자명하지 않은 흥미로운 결론을 얻고 있으며, 이를 통해 단순하고 단편적으로 보이는 사실들에 내재한 가치를 밝혀냈다. 그의 연구 주제 중에는 도형의 무게 중심, 원의 넓이, 원주율, 입체도형의 부피, 극한, 정적분, 무한소와 불가분량의 발견술적 활용, 지레의 원리, 유체정역학, 부력 등이 있으며, 이러한 주제는 중등학교 과학 및 수학 교육과정에서 중요하게 다루는 내용이다.

또한 Plutarch에 의하면 그는 모든 애정과 열정을 연구에 쏟아 부은 사람이었다. 연구에 너무 열중하여 종종 강제로 목욕탕에 끌려가기도 했지만, 그곳에서 조차 벽난로 재(炭)위에 기하학적 도형을 그리거나 향유를 바른 그의 몸 위에 손가락으로 그림을 그리며 연구를 계속했다는 일화가 있다(조운동, 2007). 이러한 모습은 Csikszentmihalyi (1996)가 언급한 창의적인 과정을 수행할 때 이루어지는 ‘몰입’의 예로 볼 수 있다 (노혜숙, 2003). Csikszentmihalyi는 창의적인 사람들이 새로운 것을 만들어 낼 때 자기 자신, 시간, 그리고 주변마저 잊어버리고 몰입을 한다고 했다. 목욕탕에서 뛰쳐나온 일화, 그가 마지막 숨을 거둘 때의 일화 등에서도 Archimedes의 몰입의 순간을 찾아볼 수 있다. 따라서 이 연구에서는 중학교 과학교과서에 제시되는 ‘왕관 문제’와 관련된 Archimedes의 창의적 사고 과정을 분석해 보고자 한다.

연구를 위해 Archimedes의 왕관 문제와 관련한 서적, 논문 등의 자료를 수집하여 분석하였다. 구체적인 문헌들의 목록은 표 1과 같다.

연구 진행 시점에서 2009 개정교육과정에 근거한 중학교 과학 교과서가 개발되지 않았으므로, 7차 교육과정에 근거하여 개발한 중학교 2학년 과학 교과서 9종(교학사-강만식, 교학사-정완호, 금성출판사, 대일도서, 도서출판 디딤돌, 동화사, 두산, 블랙박스, 지학

사) 중 물질의 고유한 성질인 ‘밀도’를 다루는 단원에서 Archimedes의 왕관 사례에 대한 설명이 제시된 6종(교학사-정완호, 금성출판사, 대일도서, 도서출판 디딤돌, 동화사, 두산)의 교과서와 2007 개정교육과정의 중학교 1학년 과학교과서 14종(교학사, 금성출판사, 대교, 도서출판 두산동아, 디딤돌, 동화사, 미래엔, 미래엔컬처그룹, 삼화출판사, 성안당, 지학사-복완근, 지학사-심국석, 천재교육-유준희, 천재교육-이면우) 중 힘과 운동 단원에서 ‘부력’을 다루면서 아르키메데스의 발견을 소개한 6종(교학사, 도서출판 디딤돌, 미래엔, 미래엔컬처그룹, 성안당, 지학사-복완근)의 교과서에 제시된 내용을 분석하였다.

7차 교육과정의 중학교 2학년 과학교과서 6종 중에서 5종(금성출판사, 대일도서, 도서출판 디딤돌, 동화사, 두산)은 아르키메데스가 목욕탕에 들어가서 자신의 몸이 잠긴 부피만큼 물이 넘치는 것을 발견하고, 불규칙한 물체의 부피를 물속에서 측정하는 방법을 이용하여 왕관의 밀도와 순금의 밀도를 비교함으로써 왕관의 비밀을 풀었다고 소개하고 있다. 그리고 1종(교학사-정완호)은 물속에서 부피와 부력의 관계를 이용하여 저울의 수평이 깨지는 원리로 Archimedes가 문제를 해결하였다고 제시하였다.

2007 개정교육과정의 중학교 1학년 교과서 6종 중에서 2종(교학사, 미래엔 컬처그룹)은 목욕탕에서 아르키메데스가 부력을 처음 발견하고 기뻐서 유레카라고 외쳤다고 소개하였으며, 1종(미래엔)은 아르키메데스가 부력의 원리를 이용해 왕관의 문제를 해결했다고 소개하였다. 또한 2종(성안당, 지학사-복완근)은 같은 무게의 다른 물질은 부피가 다르며 물에서 넘치는 부피 차이에 의해 왕관의 문제를 해결했다는 밀도의 개념으로 Archimedes의 발견을 소개하면서, 아르키메데스의 원리는 “액체 속에 있는 물체는 자신이 밀어낸 액체의 무게만큼 부력을 받는다.”라는 내용으로

표 1
Archimedes 왕관문제 관련 문헌

문헌명	저자	출판년도
The Ten Books On Architecture(De Architectura Libri Decem)	Marcus Vitruvius Pollio	기원전 1세기
La Bilancetta (The Little Balance)	Galileo Galilei	1586
MAGIA NATURALIS (Natural Magic)	Giambattista della Porta	1589
The Act of Creation	Arthur Koestler	1964

소개하고 있다. 따라서 밀도와 부력의 관계가 단절된 채로 Archimedes가 발견한 것과 찾아낸 원리의 관계가 나열식으로 제시되었다. 1종(도서출판 디딤돌)의 교과서에서만 물속에서 부피와 부력의 관계를 이용하여 저울의 수평이 깨지는 원리로 Archimedes가 문제를 해결하였다고 제시하였다.

2. 과학자의 창의적 사고과정 분석 모델

과학적 사고 유형과 창의적 사고 유형에 대한 선행 연구들을 조사하고, 그 중 이 연구에 적합한 사고 모형과 요소를 선택하여 과학자의 창의적 사고과정 분석 모델을 구성하였다. 관련 문헌의 목록은 표 2와 같다.

과학자의 창의적 사고과정에서는 가설 창조의 과정이 선행되어야 하는데 이 과정을 귀추적 추론 과정으로 설명할 수 있다. 귀추적 추론을 통해 하나의 잠재적인 설명인 가설을 창조되면 이 가설을 시험하는 과정을 통해 정당성이 입증될 수 있다. 여러 문헌에서는 가설이 창안되는 귀추 과정만 강조하거나 가설이 정당화 되는 연역적 과정만 강조된 문헌이 많다. 따라서 이 연구에서는 귀추가 가설-연역적 과정에 포함된다고 주장한 연구들(Lawson, 1995; Lawson, 2001)의 연구를 기본으로 하고, 가설 생성 과정인 귀추 과정을 정교화한 연구들(권용주 등, 2000; 권용주 등, 2002; 권용주 등, 2003c; 양일호 등, 2006a; 양일호 등,

2006b)의 연구로부터 모델의 세부적인 하위 요소를 추가하였다. 수정된 '과학자의 창의적 사고과정 분석 모델'은 그림 1과 같다.

그림 1의 첫 단계는 문제 상황으로부터 시작된다. Weisberg (2005)는 문제 상황을 잘 정의된 문제(well-defined problem)와 빈약하게 정의된 문제(ill-defined problem)로 구분하였다(김미선, 2009). 이때 '빈약하게 정의된 문제'는 Getzel과 Csikszentmihalyi가 1976년 연구에서 처음 도입한 '문제 발견(Problem finding)'이라는 용어와 일맥상통한다(Getzel & Csikszentmihalyi, 1976). 이러한 맥락에서 Einstein과 Infeld (1938)는 문제해결 그 자체보다는 새로운 문제를 만들어내는 문제의 발견이 과학적 발전에서 더 중요하다고 주장했다.

'잘 정의된 문제'란 이미 알려진 문제해결 절차를 이용하거나 재생산하여 해결이 가능한 문제를 말한다. 이러한 문제들은 보통 학교 과학교육에서 제시되는 문제로 창의적 사고과정과는 별 관계가 없다. 반면 '빈약하게 정의된 문제'는 개방적이며 기존의 문제해결 절차를 사용하여 해답이나 사용될 전략이 명확히 나타나지 않는 문제들을 말한다. 이러한 문제들은 분명하게 드러나는 문제로 재발견되어야 한다. 정현철 등(2002)는 과학에서의 창의성을 "과학의 기본지식과 탐구과정기술을 기반으로 확산적 사고와 비판적 사고과정을 통해 새로운 문제를 발견해 내며 적절하

표 2
과학적 사고 유형 관련 선행 문헌

영역	문헌명	저자	출판년도
	Pattern of discovery(과학적 발견의 패턴)	Hanson (송진웅 · 조숙경 역)	1958 (1995)
과학적 사고 과정	Science Teaching: And the development of thinking	Lawson	1995
	예비 과학교사들의 가설 창안 과정에 대한 탐색적 분석	권용주 등	2000
	과학적 설명 지식의 창의적 생성	권용주 등	2002
	과학자의 과학지식 생성 과정에 대한 심층 면담 연구	양일호 등	2006a
	Charles Darwin의 자서전에 나타난 사고 과정 분석	양일호 등	2006b
창의적 사고 과정	과학 창의성 계발을 위한 프로그램 개발	정현철 등	2002
	과학적 창의성 모델의 제안	박종원	2004
	Science Teaching: And the development of thinking	Lawson	1995
	Promoting Creative and Critical Thinking Skills in College Biology	Lawson	2001

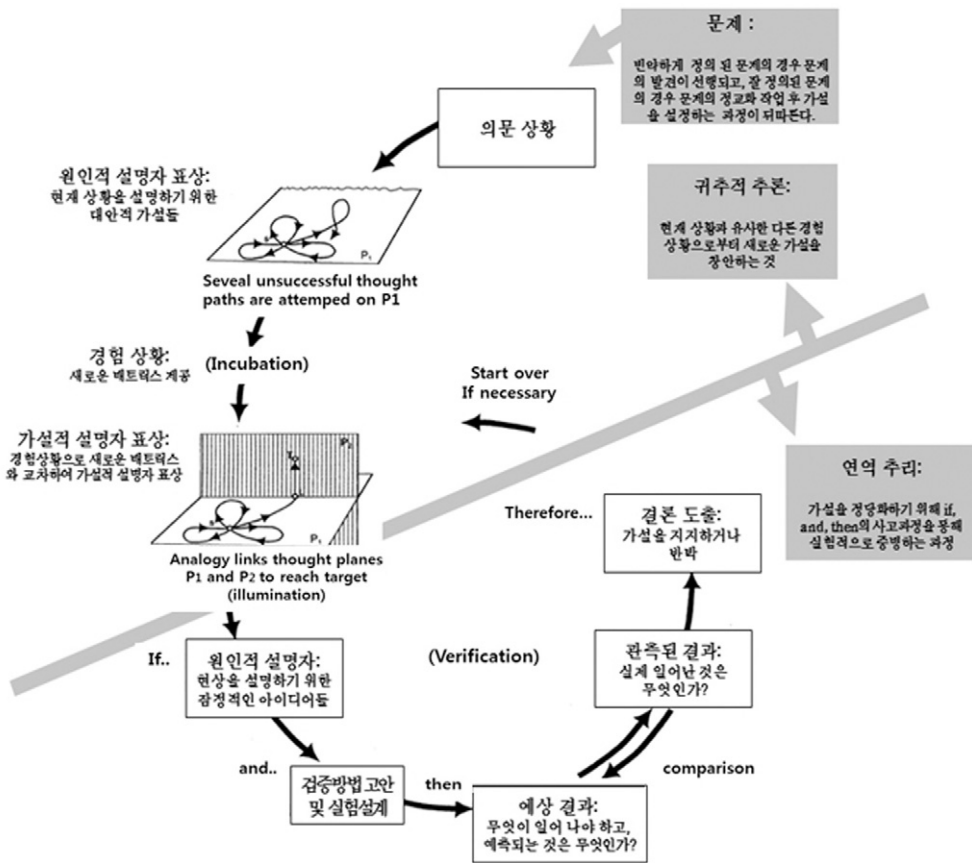


그림 1 과학자의 창의적 사고과정 분석 모델

고 새로운 해결방법을 발견하는 것"이라고 정의했다. 이러한 창의성의 발휘는 빈약하게 정의된 문제를 접했을 때 가장 잘 나타난다.

Lawson (2001)는 과학적 사고과정 모형에 Koestler (1964)의 이연현상의 아이디어를 추가하여 창의적 비판적 사고 모델을 제안하였다. Koestler (1964)는 깊은 발견을 촉발하는 사건에는 항상 복수의 사고관의 교차가 있다고 주장했다. 이 연구에서는 과학자의 창의적 사고과정 분석 모델의 기본틀로 Lawson(2001)이 제안한 모델을 선정하였는데, 이 모델에 생략되어 있는 가설 설정 과정을 보완하기 위해 귀추적 과정이 좀 더 상세히 기술되어 있는 권용주 등 (2000, 2002, 2003a, 2003c)의 연구 내용을 추가하여 모델을 정교화 하였다. 문제를 해결하는 과정에는 가설 설정과정이 매우 중요한데, Lawson의 모델에는 이 과정은 생략되고, 가설이 설정 된 후 정당화하는 과정만 부각되어 있기 때문이다.

수정된 모델에서는 문제가 정교화된 뒤, 현재의 의문 상황과 유사한 경험 상황을 통해 원인적 설명자를 표상하는 단계가 추가되어 있다. 원인적 설명자 표상에서 의문을 해결하기 위한 여러 가설이 제안될 수 있으며, 이러한 가설은 정당화 단계를 거쳐 지지되거나 기각된다. 첫 번째 사고관에서 원인적 설명자를 탐색하다가 문제 해결에 실패하고 막다른 골목에 도달하게 될 때, 새로운 경험 상황에 의해 두 번째 사고관이 사고의 전환을 일으켜 가설적 설명자를 표상할 수 있다. 이 과정은 그림 2와 같다.

이렇게 생성된 가설을 검증하는 과정으로 Lawson (1995)은 제안된 실험 또는 관찰의 일반화의 과정을 포함하는 연역법 (Deduction)을 제안했다. 즉, 가설들을 검증할 때, 가설-연역적 사고 패턴을 따르고, 이 과정은 if, and, then과 therefore의 언어 형식을 따른다. If...로 설명되는 원인적 설명자들을 And...의 과정에서 연역 추리를 수행하며 테스트 하여,

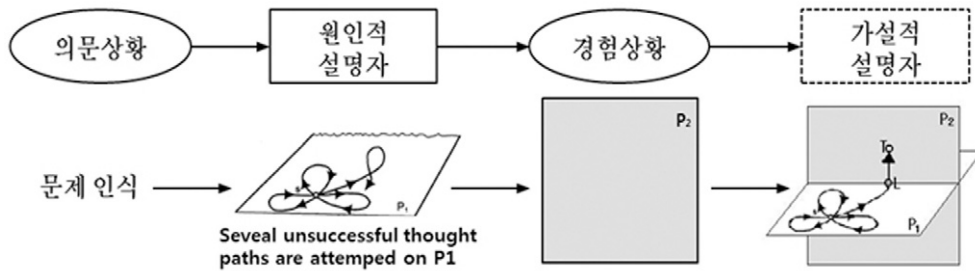


그림 2 가설적 설명자를 표상하는 과정

Then...의 과정에서 기대되는 결과와 실제 관측된 결과를 비교하고 Therefore...과정에서 가설을 지지할 것인지 반박할지 결정한다.

모든 문헌 분석 과정은 과학교육 전문가 1인과 화학 교육 박사과정 1인, 석사과정 4인이 참여한 정기적인 협의회를 통해 지속적으로 논의되었고, 이러한 과정을 통해 분석의 타당성을 확보하도록 노력하였다.

Ⅲ. 결과 및 논의

1. The Ten Books On Architecture와 The Act of Creation에 나타난 Archimedes의 사고과정

Archimedes가 22세 때 시라쿠스의 Hieron 왕의 부탁을 받고 해결했다고 알려진 ‘왕관문제’와 관련된 일화는 기원전 1세기 로마의 공학자이며, 건축가였던 Marcus Vitruvius Pollio의 건축십서 (The Ten Books On Architecture)에 최초로 등장한다.

시라쿠스의 왕관을 가진 후 Hieron는 불멸의 신들을 기리기 위해 황금관을 사원에 바치기로 결심한다. (중략) 그러나 나중에 금 대신 동일한 양의 은이 왕관의 제조에 추가되었다는 소문이 들렸다. Hieron는 자신이 속았다는 것에 분개했지만, 어떻게 속임수를 찾아낼 수 있는지는 알 수 없었다. 그래서 아르키메데스에게 이 문제를 고려하도록 부탁했다. 시간이 흐른 후, 그의 마음속에 아직 이 사건을 생각하면서, 그는 우연히 목욕탕으로 향했고, 욕조에 몸을 담그는 순간, 그의 몸이 물속으로 점점 더 가라앉을수록 더 많은 양의 물이 넘쳐흐르는 것을 관찰했다. 그 순간 문제를 설명할 수 있는 방법을 깨닫고, 그는 목

욕탕에서 뛰어나와 그의 집까지 벌거벗은 채로, 그가 찾고 있었던 것을 발견했다고 외치며 뛰어갔다. 그가 뛰면서 되풀이하며 외친 단어는 그리스어로 “Εὕρηκα, εὕρηκα” [= “Eureka, eureka” = “내가 찾았다, 내가 찾았다”]이다. 그는 같은 질량의 순금과 은으로 각각 두 개의 왕관을 만들었다. 그리고 물로 가득찬 그릇에 은으로 만들어진 왕관을 넣었다. 그릇에서 은의 부피와 동일한 양의 물이 흘러넘쳤다. 그런 후 왕관을 꺼내고, 잃어버린 물의 양과 동일한 양의 물을 전과 동일하게 그릇의 가장자리까지 수면이 평평해지도록 부었다. 이와 같은 방법으로 그는 은의 무게에 해당하는 정확한 물의 양을 찾았다. (중략) 마찬가지로 금으로 만든 왕관을 물이 가득 찬 그릇에 집어넣고, (중략) 같은 무게의 금일 때 보다 은일 때 흘러넘치는 물의 양이 더 많다는 것을 발견했다. 이와 같은 물의 손실에서 추론하여, 그는 황금관에 은과 금이 섞여 있다는 것을 찾아냈고, 하청업자의 속임수를 명확하게 밝힐 수 있었다.

(Marcus Vitruvius Pollio의 건축십서 중에서)

실제 Archimedes가 ‘왕관 문제’를 해결한 지 200년이나 지난 후에 쓰인 이 책의 기록에서 Vitruvius는 Archimedes가 흘러나온 물의 부피를 측정하는 방법으로 왕관문제를 해결했다고 설명하고 있다. 이 설명은 7차 교육과정의 5종 교과서(두산, 동화사, 금성출판사, 도서출판 디딤돌, 대일도서)와 2007 개정교육과정의 2종 교과서(지학사-북완근, 성안당)의 설명과 같은 시각이다.

이러한 상황에서 Archimedes에게 주어진 문제는 Hieron 왕에게서 받은 왕관을 훼손하지 않으면서도 순금인지 아닌지를 확인하는 것이었다. 그가 ‘밀도’의 개념으로 이 문제를 해결하려고 하였다면, 왕관의

정확한 부피를 측정하는 것이 관건이 된다. 그렇다면 이제 새롭게 발견된 문제는 ‘왕관의 부피를 정확하게 측정하는 방법은 무엇인가?’ 이다.

이 문제를 해결하는 첫 번째 원인적 설명자는 Archimedes가 뛰어난 능력을 발휘할 수 있었던 수학적 계산이었을 것이다. Archimedes는 뛰어난 수학자로 원추곡선의 기하학에 대해 조예가 깊었고, 곡면의 넓이, 구의 부피, 무게 중심, 부체의 안정성과 같은 여러 수학적 문제를 해결할 수 있는 능력이 있었다. 또한 그는 넓이와 부피를 결정하는 증명법으로 Eudoxus가 발명한 ‘이중귀류법’을 개량하여 사용하였고, 이는 17세기 미적분의 발명을 이끌어내는 토대를 마련해 주었다 (조운동, 2007). Archimedes는 이러한 수학적 능력을 토대로 복잡한 왕관의 모양을 일일이 조각조각 부피를 계산하고, 이를 합산하여 왕관 전체의 부피를 계산할 수도 있었다. 그러나 이 방법은 너무 복잡하고 계산 과정에서 약간의 실수만 발생해도 큰 오차가 발생할 수 있기 때문에 문제 해결에 도달하지 못하고 실패를 경험하게 되었을 것이다 (그림 3).

규칙적인 물체의 부피는 가로, 세로, 높이를 정확하게 측정하여 곱하면 구할 수 있으며, 왕관도 다시 녹

여 규칙적인 물체를 만든다면 부피 측정이 가능하지만, ‘왕관 문제’에는 ‘절대 왕관을 훼손하면 안 된다.’라는 전제조건이 있다. 이러한 전제 조건 때문에 문제 해결에 실패한 Archimedes는 휴식을 위해 찾은 목욕탕에서 새로운 경험을 하게 된다. Vitruvius는 Archimedes가 욕조에 들어가는 상황을 통해 ‘물’로 이 문제를 해결할 수 있는 어떤 실마리 즉, 새로운 원인적 설명자를 발견하게 되었다고 설명하였다. 그는 물이 가득 찬 욕조에 몸이 더 많이 들어갈수록 물이 더 많이 흘러넘치는 것을 관찰하여 ‘불규칙한 물체의 부피를 측정하는 방법’을 고안해 낸 것이다. 천칭(equal-arm balance)은 BC 5000년 경 고대 이집트에서 이미 발명되어 사용되었고, 계속 정교화 되어 로마인들에게 전해졌다(황동주, 2010). 따라서 Archimedes가 살던 B.C. 3세기 무렵에는 무게를 정확하게 측정 가능한 저울이 있었기 때문에, 왕관을 집어넣을 수 있는 크기의 그릇만 있으면 밀도 개념으로 이 문제를 해결할 수 있었을 것이다.

그러나 이론적으로 흠잡을 데 없는 이 방법은 실제 실험과정에서는 문제가 발생하는데, 바로 물의 표면 장력 때문이다. 물로 가득 찬 그릇에도 표면 장력으로

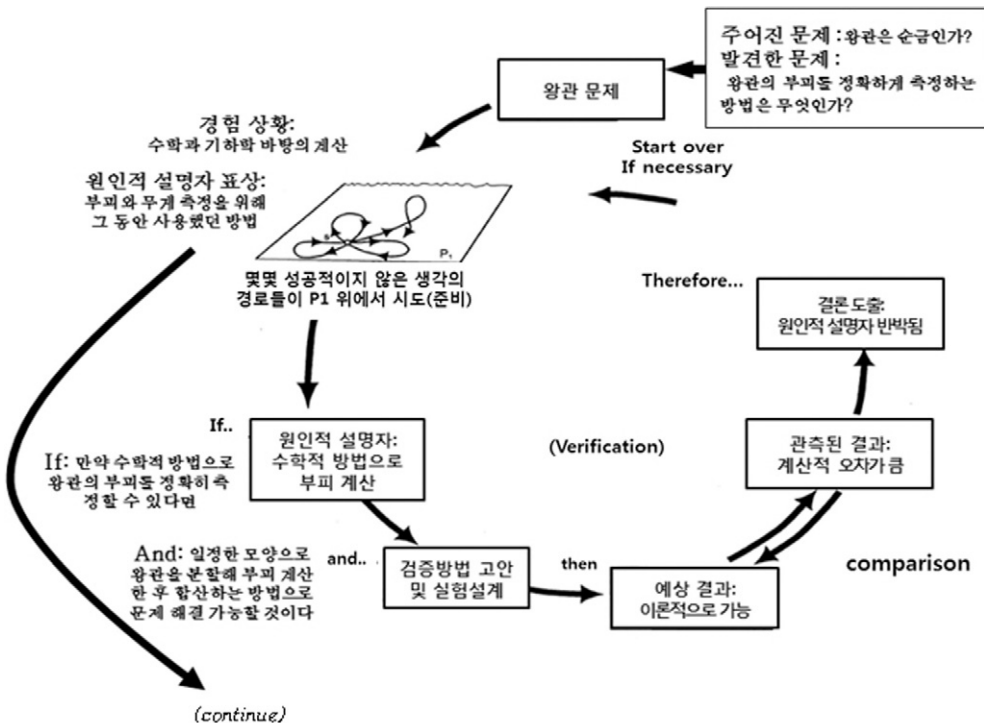


그림 3 수학적 방법을 토대로 한 과학자의 사고과정

인해 소량의 물체를 넣을 때 물이 넘치지 않으며, 같은 무게의 물체라 하더라도 물체의 모양이나 넣을 때의 속도 등에 따라 넘치는 양이 달라진다. 흘러나온 물은 그릇의 바깥 표면에 묻는 등 유실 확률도 높다. 따라서 이러한 오차를 줄이기 위해 그릇의 절반 정도 물을 넣고 수위를 표시한 다음 물체를 담가 상승한 수위에 표시를 하였을 것이라고 Koestler(1964)는 Archimedes의 발견에 대해 설명했다.

어느 날 목욕탕에 갔을 때 아르키메데스는 그의 몸을 욕조에 담그자 수면이 욕조에 있는 하나의 오점에서 다음 오점으로 올라가는 익숙한 광경을 아무 생각 없이 바라보다가 빠져나간 물의 양이 그 자신의 몸이 물에 잠겨 있는 부분의 부피와 동일하다-게다가 그것을 저울로 측정할 수 있을 것이다-는 생각이 전광처럼 스쳤다. 그는 자신의 몸을 아무런 손상 없이 녹인 것이다. 그리고 왕관도 같은 방법이 가능했다.

(Koestler 의 The Act of Creation 중에서)

약간 보완된 방법을 사용하고 있지만 Koestler도 Vitruvius와 동일하게 '왕관문제'를 부피 비교를 통해 해결했다고 보고 있다.

그림 4는 기원전 4세기 마케도니아와 다르다넬스 해협의 무덤 유적에서 발굴한 왕관의 모습이다. Hieron왕이 제작한 왕관도 기원전 4세기의 마케도니아와 다르다넬스 해협의 무덤 유적에서 발굴한 것과 유사한 형태였을 것이라고 가정할 수 있다.

이 중 가장 큰 왕관은 Verginia왕관으로, 처음 만들어졌을 당시보다 이들이 손실되었음에도 불구하고 최대 직경이 18.5cm이고 질량이 714g에 달한다. 이보다 크기가 작은 왕관은 물의 높이가 더 적게 올라가므로 측정의 정확성과 계산의 편리함을 위해 Hieron왕이 제작한 왕관의 무게를 1000g으로 가정하고, 지름이 20cm인 둥근 그릇에 왕관을 담아 물의 높이가 얼마나 올라가는지 계산해 보자. 우선 이 그릇의 밑면적은 314cm^2 가 된다. 순금의 밀도는 19.3g/cm^3 이므로, 순금이 차지하는 부피는 $1000/19.3=51.8\text{cm}^3$ 일 것이다. 그렇다면 지름 20cm인 둥근 그릇에 담긴 물이 올라가는 높이는 $51.8/314=0.165\text{cm}$ 이다.

만약 부정직한 금세공인이 30%의 금을 은으로 바꿔치기했다고 가정한다면, 은의 밀도는 10.5g/cm^3 이므로, 합금 왕관의 부피는 $700/19.3 + 300/10.5 = 64.8\text{cm}^3$ 이다. 이보다 은의 함량을 높인다면 색깔이나 강도(연성)등의 요인에 의해 육안으로 속임수를 알아챌 수 있기 때문에 이보다 더 혼합비율을 높이는 어려웠을 것이다. 이 합금 왕관은 지름 20cm인 둥근 그릇의 수면의 높이를 $64.8/314 = 0.206\text{cm}$ 높아지게 할 것이다.

$$\text{순금의 밀도} = 19.3\text{g/cm}^3, \text{은의 밀도} = 10.6\text{g/cm}^3$$

순금 왕관의 경우

$$\text{순금 왕관의 부피} = \frac{1000\text{g}}{19.3\text{g/cm}^3} \approx 51.8\text{cm}^3$$

$$\begin{aligned} \text{지름 20cm 둥근} \\ \text{그릇에서} \\ \text{물이 올라가는 높이} \end{aligned} = \frac{51.8\text{cm}^3}{314\text{cm}^2} \approx 0.165\text{cm}$$



Golden wreath of olive leaves
BC 4세기 작품
Archaeological Museum of Amphipolis



Gold Oak Leaf Crown from the Dardanelles
BC 4세기 작품
British Museum of London



Golden wreath from Verginia, Greece
BC 4세기 작품
Vergina Tomb Museum

그림 4 기원전 4세기경의 왕관

30%의 은이 섞인 왕관일 경우

$$\begin{aligned}
 \text{합금 왕관의 부피} &= \frac{\text{금의 부피}}{\text{금의 질량}} + \frac{\text{은의 부피}}{\text{은의 질량}} \\
 &= \frac{\text{금의 밀도}}{\text{은의 밀도}} \\
 &= \frac{700\text{g}}{19.3\text{g/cm}^3} + \frac{300\text{g}}{10.6\text{g/cm}^3} \\
 &= 36.3\text{cm}^3 + 28.3\text{cm}^3 \approx 64.6\text{cm}^3 \\
 \text{지름 20cm 동근 그릇에서 물이 올라가는 높이} &= \frac{64.6\text{cm}^3}{314\text{cm}^2} \approx 0.206\text{cm}
 \end{aligned}$$

순금으로 된 왕관에 의한 수면의 높이 변화는 0.165cm이고, 합금 왕관에 의한 수면의 높이 변화는 0.206cm로 그 차이가 0.041cm이다. 이 차이는 표면 장력이나, 왕관에 붙은 공기방울 등에 의한 오차를 극복하기 어렵고 직접 관찰하여 측정하기에는 너무 작은 변화이다. 또한 왕관이 1000g보다 더 가볍거나 은의 합금 정도가 30%이하라면 수면 높이의 변화는 더 작아질 것이다. 따라서 이러한 사고과정 역시 왕관의 문제를 해결하는데 실패하게 된다(그림 5).

2. The Little Balance와 Natural Magic에 나타난 Archimedes의 사고 과정

AD 5세기, 작가 미상의 ‘Carmen de ponderibus et mensuri’ 라는 시에 따르면, 아르키메데스는 금관과 순금을 양팔저울에 올려 균형을 맞춘 상태에서 물에 담근 후 균형이 깨지는지 여부로 문제를 해결했다고 전한다 (조운동, 2007). Archimedes가 ‘왕관 문제’를 해결한 지 천 팔백년 이상이 흐른 후, 22살의 젊은 이탈리아의 과학자 Galileo(1586)도 La Bilancetta-The Little Balance-라는 짧은 논문에서 Archimedes의 부력 법칙과 지렛대의 법칙에 기초한 해결 방법을 제시했다.

Galileo는 실험을 증시한 과학자답게 물이 높아지거나 넘치는 차이로부터 왕관의 문제를 해결하는 일은 현실적으로 명확한 결론에 이르기 어렵다고 지적하고, 왕관에 섞인 혼합물의 조성을 밝힐 수 있는 방법을 Archimedes의 대표적인 저작인 《부체에 관하여(On Floating Bodies)》와《평면의 균형에 대하여(On the equilibrium of planes)》에 실린 정리를 통해 찾을 수 있다고 주장하였다. Archimedes의《부체에 관하여(On Floating Bodies)》는 다면체를 물에 띄웠을 때 무게 중심과 균형에 대해 정리한 저서로, 액체에 잠긴 물체는 잠긴 부피의 액체 무게만큼 가벼워진다고 주장하고 있다. 또한《평면의 균형에 대하여(On the Equilibrium of Planes)》에서는 평면 도형의 무게 중심을 찾는 방법을 정리하고 있다. 이 두 저

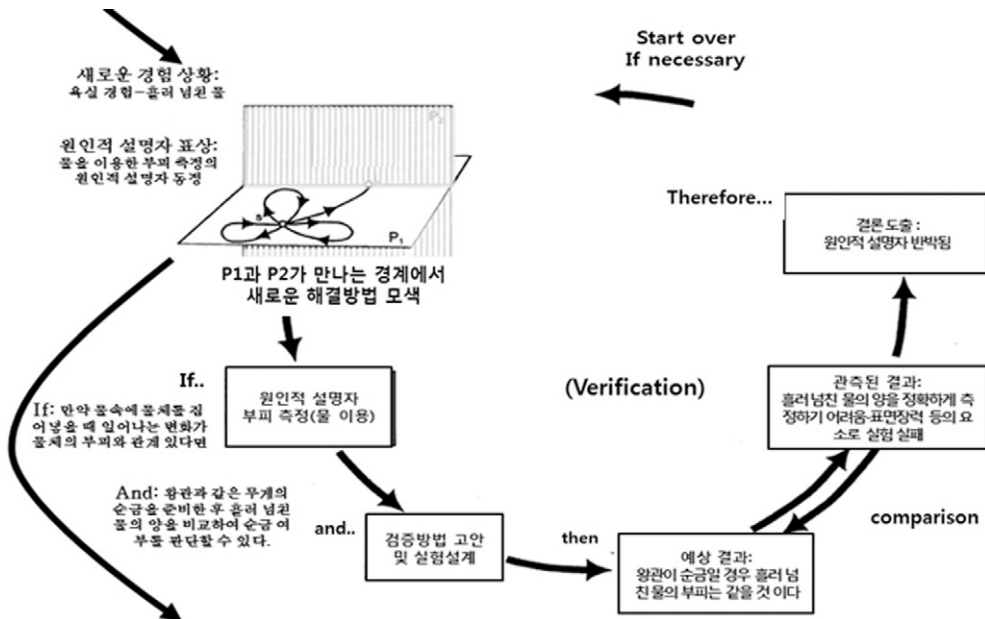


그림 5 물속에서 왕관의 부피측정에 관련된 과학자의 사고과정

서에서 영감을 얻은 Galileo는 '저울'을 사용한 해결법을 다음과 같이 제안했다.

이 방법은 저울 (balance)을 사용한다는 것으로 구성되어 있고, (중략) 그것을 이해하는데 반드시 알아야 할 첫째는 물속에서 가라앉은 고체의 무게는 공기 중에서의 무게보다 가볍고, 이 가벼워지는 것은 같은 양의 물의 부피에 해당하는 무게라는 것이다. 이 원리는 아르키메데스에 의해 증명되었다. 예를 들어, 황금 공을 물속에 담갔다고 가정해 보자. 만약 공이 물로 만들어졌다면 물속의 물은 가라앉지도 떠오르지도 않기 때문에 공은 전혀 무게가 없을 것이다. 물속에서 금의 무게가 공기에서보다 더 작은 것이 명확하다. 다른 금속의 경우도 동일하게 (중략) 물속에서의 무게는 다른 비율로 감소된다. 예를 들어, 금의 무게가 물의 20배라고 가정해보자; 금은 공기 중에서의 전체 질량의 1/20만큼 물에서 덜 나간다. 은의 무게는 물의 12배라고 가정해보자; 은의 무게를 물속에서 측정하면 1/12만큼 감소된다. 그러므로 물속에서 금의 무게는 은보다 더 적게 감소한다. (중략) 정확한 저울의 한쪽 팔에 금속 조각을 매달고, 다른 쪽 팔에는 금속 조각의 무게만큼의 분동을 매단다. 만약 물속에 금속을 담그고, 공기 중에 분동을 남기면, 우리는 금속과 균형을 맞추기 위해 [balance beam의] suspension 지점에 가깝도록 분동(평행추)을 가져와야만 한다.

(Galileo의 La Bilancetta-The Little Balance-중에서)

Galileo는 공기 중에서 같은 무게의 금, 은, 왕관의 부피는 다르기 때문에 물속에서 무게를 측정하면 부력 때문에 무게가 달라진다는 점을 이용하여 왕관 문제를 해결하고, 정밀한 측정으로 혼합물의 비율까지 알아낼 수 있다고 전한다. 만약 왕관이 순금으로 만들어졌다면, 물속에서 측정한 순금 덩어리의 무게와 왕관의 무게는 같아야 하지만, 은이 혼합된 합금이라면 물속에서 측정한 왕관의 무게는 순금 덩어리의 무게보다 가벼울 것이다.

이탈리아 학자 Giambattista della Porta (1535-1615)도 역시 1589년에 출판된 MAGIA NATURALIS (Natural Magic)라는 책에서 아르키메데스가 황금왕관의 문제를 어떻게 해결했는지에 관한 설명을 제안하였다. Galileo의 La Bilancetta-The Little

Balance-가 나온 지 3년 뒤에 출판된 이 책에서 그는 Vitruvius의 설명을 비판하고, 갈릴레오와 같이 부력의 법칙과 지렛대를 이용한 아르키메데스의 원리로 설명하였다.

그는 가득찬 그릇에 금덩어리를 집어넣고 꺼낸 후, 같은 이유로 흘러넘치는 물이 같은 무게의 은일 때보다 더 적은 양의 물이 흘러넘친다는 것을 발견했다. (중략) 하지만 이 작업은 어렵다. 작은 양을 왕관에 섞었다면 이를 식별할 수 없을 것이고, 눈으로 분명하게 나타나지도 않기 때문에 부피측정 방법은 불충분하다. (중략) 공기 중에서 한쪽 접시 위에 혼합된 금을 올려놓고, 다른 쪽에는 순수한 금을 올려놓은 후 완벽한 균형을 맞춘다. 그리고 접시를 물로 차 있는 용기에 물속의 반 정도 깊이까지 가라앉힌다. 그러면 그것은 물속에서 본성을 바꾸어, 공기 중에서 균형을 이루던 것이 균형을 이루지 않을 것이다. (중략) 혼합된 금보다 순수한 금이 더 적은 공간을 차지하기 때문에 더 무거워지는 것이다.

(Giambattista della Porta의 MAGIA NATURALIS 중에서)

이 책의 해결 방법과 Galileo가 제안한 방법의 유일한 차이는 두 접시를 동시에 물속에 넣은 것뿐이며, 그 결과는 동일하게 나타난다. 이러한 유형의 설명을 한 교과서는 7차 교육과정의 1종(교학사-정완호)와 2007 개정교육과정의 1종(도서출판 디딤돌)이었다.

Galileo나 Giambattista della Porta가 제안한 방법의 특징은 물의 표면장력이나 왕관에 붙은 공기 방울에 의한 오차로 인한 문제가 발생하지 않으며, 평형이 깨어짐을 이용하기 때문에 매우 작은 부피 차이도 측정이 가능하다는 점이다. 따라서 이러한 사고과정은 왕관의 문제를 해결하는데 성공적이다(그림 6).

3. Archimedes의 사고 과정 분석이 과학교육에 주는 함의

Archimedes는 무세이온 (Mouseion)에서 수학하였는데, 무세이온은 철학을 깊이 연구하고 아이디어 (Idea)적 고찰만 강조한 Plato의 아카데미아 (Academeia)나 문답과 관찰만 강조한 Aristoteles의 리케이온 (Lykeion)과 달리 이론과 실험을 동시에 중

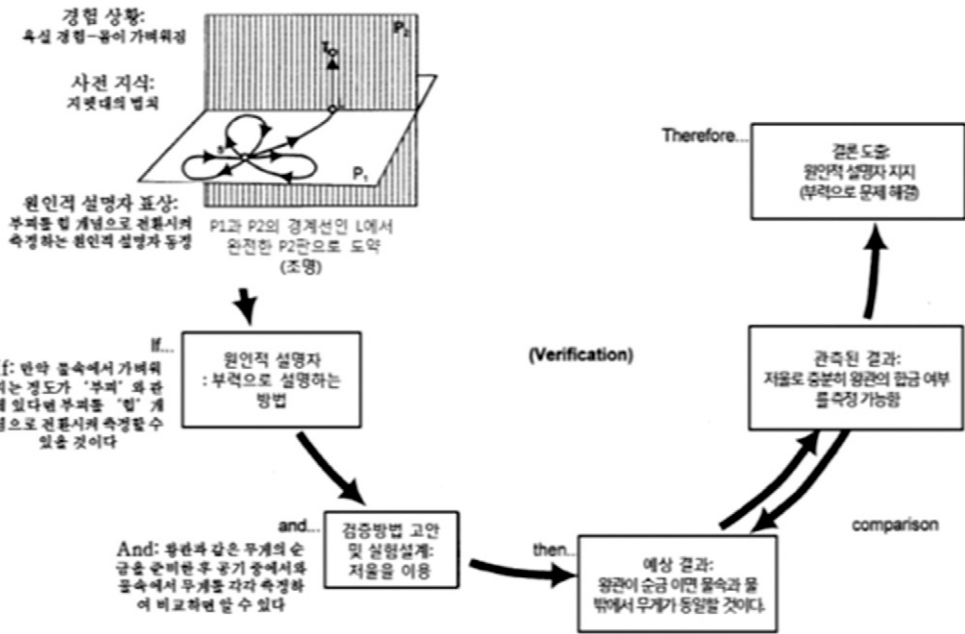


그림 6 물속에서 왕관의 부력 차이를 이용한 측정에 관련된 과학자의 사고과정

요시 여기는 과학의 전당이였다(동완 역, 2006). 따라서 무세이온 (Mouseion)에서 수학한 Archimedes도 자연스럽게 이론을 검증하고 확인하는 실험을 중시했으며, 자신의 이론을 실용화하고 응용하는데 천부적인 재능을 발휘했다. 왕관 문제에서 Archimedes가 부딪혔던 문제는 이론적으로 완벽한 수학적 계산이나 물속에서의 부피 측정 방법이 실험적으로는 불가능하다는 점이었을 것이다.

그러나 실험의 중요성을 강조하는 과학교과서에서는 실험적으로 측정 불가능한 물속에서의 부피 측정을 통한 밀도 개념으로 왕관 문제를 해결할 수 있다는 설명을 오랫동안 고수하여 왔다. 7차 교육과정에서는 중학교 2학년의 '물질의 특성' 단원에서 5종의 과학 교과서에서 Archimedes의 '왕관 문제'를 '이미 알고 있는 왕관의 무게'와 '불규칙한 물체의 부피 측정 방법'을 목욕탕에서 알아냄으로써 '밀도' 개념으로 해결했다고 제시하였다. 그리고 2007 개정교육과정에서는 중학교 1학년 교과서 '힘과 운동' 단원에서 부력을 다루면서, 2종의 교과서가 '밀도' 개념으로 '왕관 문제'를 해결하였다고 제시하였으며, 1종 교과서가 부력의 원리를 이용하여 문제를 해결하였다고 진술하였다. 이러한 교육과정을 살펴보면 동일한 현상을 설명하기 위하여 '밀도' 개념과 '부력' 개념이 각각 독

립적으로 제시되어 있음을 알 수 있다. 그리고 교육과정 안에서 이 두 개념은 유일하게 Archimedes의 왕관의 문제를 통해 연결되고 있다.

밀도가 물질의 입자적 설명에 기초한 개념이라면, 부력은 힘 개념(중력 개념)에 기초한다. 과학교육과정에서 이 두 개념은 서로 분리되어 설명되다가 '물체가 뜨고 가라앉는 것을 설명' 할 때 비로소 만나게 된다(그림 7).

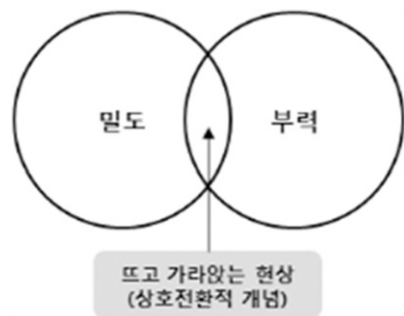


그림 7 밀도와 부력 개념 관계

물체가 유체 위에 떠 있을 때에는 물체의 무게가 중요해 지는데, 물체가 액체 위에 뜨는 현상은 물체의 무게와 부력의 상대적인 값에 따라 결정되기 때문이다(김인묵 외, 2008).

물체의 무게 > 부력 가라앉음
 물체의 무게 = 부력 가라앉거나 떠오르지 않음
 물체의 무게 < 부력 떠오름

백성혜(2001)는 이 관계에서 물체의 뜨고 가라앉음이 물체의 밀도에 따라 달라진다고 설명하였다. 물체의 무게와 부력의 관계에 관한 부등식에서 모든 항을 물체의 부피로 나누어 보면 물체의 밀도와 유체의 밀도에 관한 식으로 전환되는 것을 알 수 있다.

$$\frac{\text{물체의 무게}}{\text{물체의 부피}} > \frac{\text{부력}}{\text{물체의 부피}} \rightarrow \text{물체의 밀도} > \text{유체의 밀도}$$

이 때, 뜨고 가라앉는 것을 결정하는 장소가 '지구상'이라는 전제조건 하에서 일어나는 현상이므로, 물체의 질량과 무게를 동일시 할 수 있다. 따라서 위의 부력에 관한 부등식은 밀도에 관한 부등식으로 전환되어 재해석될 수 있다.

물체의 밀도 > 유체의 밀도 가라앉음
 물체의 밀도 = 유체의 밀도 가라앉거나 떠오르지 않음
 물체의 밀도 < 유체의 밀도 떠오름

이렇게 뜨고 가라앉는 것을 설명하는 과정에서 '부력'과 '밀도' 개념은 수학적으로 상호 호환이 가능한 개념임을 알 수 있다. Archimedes가 경험한 창의적 사고도 밀도 개념에서 부력 개념으로 사고의 전환이 일어난 것이라고 볼 수 있으며, 따라서 Archimedes의 왕관 문제를 접근할 때에는 밀도나 부력 개념의 설명을 넘어서서 사고의 전환을 통한 창의적 사고과정을 길러주는 것이 더 중요하다고 본다. Archimedes의 창의적인 사고과정의 또 다른 측면은 무게를 측정하는 천칭을 물속에 넣음으로써 측정하는 물체의 부피 차이만큼 부력차이가 생길 때 지렛대의 평형이 깨어지는 원리를 이용하여 천칭을 정확한 부피 측정의 도구로 변화시켰다는 점이다.

교과서가 실험적으로 측정 불가능하지만 이론적으로는 완벽한 설명 방식을 오랫동안 고수한 이유는 여러 가지 측면에서 찾아볼 수 있으나, 그 중 한 가지는 토마스 쿤(1970)의 '과학혁명의 구조'에서 찾을 수 있다. 그는 과학교과서의 서술이 어떻게 역사적인 정확성보다는 개념적, 논리적 전개의 자연스러움을 추구

하는지, 그리고 그러한 비역사적 서술방식이 학문 후속세대를 키워내는 과정에서 왜 효과적인지를 그의 과학혁명에 대한 논의와 관련지어 설명하였다(이상욱, 백성혜, 2012). 이에 따르면, 과학혁명의 완료와 함께 교과서가 새롭게 쓰인다는 점이 핵심으로 지적하고 있다. 과학 혁명의 결과, 패러다임이 교체되면 새로운 패러다임에 의해 '풀 가치가 있는 문제'로 인정된 문제에 대해 패러다임이 허용하는 문제풀이 방식과 일관적인 답변이 정리되는 작업이 수행된다는 것이다. 이 과정에서 새롭게 수용된 패러다임의 관점에서 가장 논리적인 과학 이론이 교과서에 담기게 되는 것이다. 비록 쿤은 이와 같은 교과서의 사후적 재구성 작업이 과학의 본성에 대해 과학자들이 잘못된 생각을 하게 하는 데 일조한다고 비판했지만 나름대로의 기능성 유용성은 있다고 본 것이다.

이처럼 과학 연구 역사의 사후적 재구성은 비록 역사적 정확성은 부족하더라도 과학교육에서 일정한 기능을 담당한다는 점을 고려할 때 의미를 부여할 수 있다. 과학교육의 목적이 과학의 역사를 정확하게 서술하는 것이 아니라, 학문의 후속 세대에 널리 수용된 패러다임을 받아들여지게 하는 것이라면 말이다. 하지만 이러한 시각에서 보더라도 과학교육에서 실험의 중요성이 부각되는 이유를 생각해 본다면, 쿤이 부분적으로만 인정했던 사후적 재구성의 합리성이 타당하다고 볼 수 없다. 과학교육에서 '실험'은 '타당한 결론'을 이끌어내는 가장 중요한 방법이기 때문이다. 즉, 왕관의 문제를 예로 든다면, 물속에서 부피를 측정하는 실험은 '밀도'의 개념으로 왕관의 문제를 풀 수 있다는 결론을 이끌어내야 한다. 만약 교과서에서 제시하는 실험이 그러한 기능을 하지 못한다면, 학교에서 수행하는 실험은 그 가치를 잃게 된다. Archimedes의 창의성은 무세이온(Mouseion)에서 수학하면서 이론과 실험의 병행을 체득하였기 때문에 나올 수 있었으며, 오늘날 과학교육에서도 이론과 실험의 관련성을 강조하기 때문이다.

IV. 결론 및 제언

Archimedes의 사례를 통해 과학자의 창의성에서 요구되었던 다양한 사고의 융합 과정을 분석하고, 이를 통해 창의적인 인재 육성을 위한 고찰을 해 보았다. Archimedes의 사례 이외에도 우리가 교과서를

통해 다루는 다양한 과학자들의 창의적인 발견 과정을 재구성할 수 있다면, 이러한 과정을 학생들이 경험하도록 교육의 단계를 제공함으로써 학생들이 창의적 사고 능력을 키워나갈 수 있을 것이라고 생각한다.

이 연구에서는 또한 과학자들의 창의적인 발견에는 자연 현상을 경험하는 실험 과정이 중요함을 제시하였으며, 과학교과서가 이러한 부분에서 제 역할을 다하지 못하는 이유에 대해서도 고찰해 보았다. Archimedes와 이를 재해석한 Galileo의 사례에서 볼 수 있듯이, 새로운 과학적 발견과 창의적 사고는 실험과 관찰을 통한 자연 현상의 새로운 발견으로부터 이루어진다는 것을 알 수 있다. 따라서 굳이 설명한 ‘합리적으로 재구성된 패러다임’으로서의 과학교육은 과학자가 경험한 창의적 사고과정을 학생들이 경험하는데 방해가 될 수 있다.

Archimedes의 창의적 문제 해결의 사고 과정 중 첫 번째 단계는 의문 생성 단계로 해석 될 수 있는데 이것은 이미 제시된 ‘왕관 문제’를 접하는 것이다. 그러나 ‘빈약하게 정의된 문제’로 인해 그는 문제 상황을 분석하고, 문제를 정교화하여 ‘새로운 문제를 발견’하게 된다. 그가 발견한 문제가 바로 ‘불규칙한 물체의 부피를 측정’하는 방법이다. 두 번째와 세 번째 단계로 Archimedes는 과거 경험 상황에 기초하여 ‘원인적 설명자’를 동정한다. 면적계산법을 확립한 그였지만 계속된 실패로 Archimedes는 막다른 골목에 도달하고, 약간의 휴지기를 갖는다. 이 상태로 목욕탕으로 향하게 되고 그는 그곳에서 새로운 경험을 하게 된다. 바로 ‘욕조에 들어감에 따라 점점 더 많은 물이 흘러넘치고, 몸은 가벼워진다.’는 것을 경험한 것이다. 일상적인 이 경험이 그의 사전 지식과 결합하여 귀추적 추론을 통해 새로운 원인적 설명자를 동정해 내고, 이를 실험적으로 증명하려고 시도했을 것이다. 이 새로운 원인적 설명자는 불규칙한 물체의 ‘부피 측정’을 ‘힘’ 개념으로 전환한 ‘부력 측정’의 방법으로 문제를 해결하는 가설이다. 그리고 마지막 과정은 가설적 설명자를 채택하는 과정이다. Archimedes는 ‘원인적 설명자’ 중 ‘가설적 설명자’를 선택하는 과정에서 현재 의문 상황을 가장 효과적으로 설명한다고 판단되는 ‘부력 측정’ 방법을 가설적 설명자로 선택하였다. 그러나 대부분의 과학교과서에서는 학생들이 Archimedes의 사고과정을 거치도록 빈약하게 정의된 문제의 제시를 하기 보다는, 명확하게 제시된 문

제를 학생들이 규정된 한 가지 방식으로 간결하게 해결하도록 요구한다. 여기에는 원인적 설명자나 가설적 설명자를 상정하는 과정이 생략된다. 이러한 방식의 교과서 서술은 높지 않은 학생들의 수준을 고려하였기 때문일 가능성이 있다. 그러나 창의성을 기른다는 목적이 과학 영재아에게만 해당되는 것이 아니라면, 적절한 수준의 창의적 문제 해결과정에 대한 도입이 과학교육에도 필요하다고 본다.

이 연구에서는 Archimedes의 사례를 통해 창의적 사고과정에서 사전 지식의 중요성도 언급하였다. Archimedes의 창의성은 그가 수년간 쌓은 사전 지식에 의해 발현되었으며, 이를 통해 ‘왕관 문제’의 해결에 도달할 수 있었던 것이다. 그러나 사전 지식이 정상 과학으로 고착화된다면, 해결되지 않는 부분은 오차나 예외로 남게 되며, 학생들은 창의적인 사고로도 약하기 어려울 것이다. Archimedes의 사고가 창의적인 것은, 익숙한 사물로부터 지금까지 아무도 발견하지 못했던 것을 발견해 냈기 때문이다(Hanson, 1958). 즉, 그는 항상 물체의 무게를 측정하는 도구였던 저울을 사용하여 ‘불규칙한 물체의 정확한 부피를 측정’하는 방법을 알아낸 것이다. 경험 상황에서 원인적 설명자를 동정하는 과정에서 Archimedes는 사고의 도약을 하게 된다. 그러나 이러한 과정이 일회적이고 직선적인 방향으로 작용하기 보다는 반복적이고 순환적으로 나타날 것이다(Lawson, 1995). Archimedes도 자신의 가설을 입증하고 평가하는 과정에서 가설이 정교화 되어 저울의 양 끝에 같은 질량의 순금과 왕관을 매달고 물속에서 균형이 깨지는지 여부를 판단하는 가장 유용하고 효율적인 해결 방법에 도달했을 것이다.

Koestler(1964)가 주장했듯이 발견은 항상 복수의 사고 사고판의 교차에 의해 생겨나는 것이다. Archimedes는 역학이라는 학문의 습관적인 규정에 지배당한 사고판과 목욕을 하는 것에 관한 일상의 사고판이 창조적인 교차를 이루어 문제를 해결했다. 이 과정에서 귀추적 추론 과정과 사전 지식이 중요한 역할을 했다. Hayes는 ‘10년 법칙’을 주장하였는데 이는 어떤 영역에서 진정한 탁월함을 보이기 위해서는 수년의 준비기간이 필요하다는 법칙이다(임웅, 2009). 창의성에서는 이러한 10년 법칙에 의한 사전 지식이 중요한 역할을 하는데 Archimedes는 지렛대의 원리를 발견하였고, 이 원리를 응용에 뛰어나

Euclid 등 다른 기하학자들과는 달리 기하학의 문제를 푸는데도 역시 지렛대의 원리를 사용하였다. 그리고 지레의 원리를 넓이, 부피, 무게중심 등의 연구에 응용하였다(이우영, 2006). 이러한 그의 사전 지식이 사고의 도약을 도와준 디딤판 역할을 해 준 것이다.

이 연구는 과학자의 창의성이 발현되는 지점을 알아내기 위해 가설이 창안되는 지점을 가시화 할 수 있는 모델을 사용하여 분석하였다. 그 결과 사고의 판과 판이 만나는 지점에서 가설이 생성되는 것을 발견할 수 있었다. 복잡해 보이는 과학자의 문제해결과정이 하나의 가시화된 모델로 표현되어 중요한 사고의 판으로 작용한 지식을 한눈에 파악할 수 있다. 추후 더 다양한 과학자들의 문제 해결과정을 분석하여 패턴화하면 이를 바탕으로 창의적인 문제해결을 위한 교수 전략의 개발에 적용하는 연구를 할 수 있을 것이다.

국문 요약

이 연구에서는 과학자의 창의성이 발현되는 과정을 분석할 수 있는 모델을 개발하고, 이를 사용하여 Archimedes의 왕관 문제를 해결하는 사고과정을 분석하였다. 그 결과 복잡해 보이는 과학자의 문제해결 과정을 반복적이며 순환적인 모델로 표현할 수 있으며, Archimedes의 사례를 통해 과학자의 창의성에서 요구되었던 다양한 사고의 융합 과정을 분석할 수 있었다. 이 연구에서는 또한 과학자들의 창의적인 발견에서 실험의 역할을 제시하였으며, 과학교과서의 시각이 과학사적인 사실과 다른 이유에 대해서도 고찰해 보았다. 그리고 창의적 사고과정에서 귀추적 추론과 사전 지식의 중요성도 언급하였다. Archimedes는 역학이라는 사고판과 목욕이라는 일상의 사고판이 교차를 이루면서 왕관의 문제를 창의적으로 해결했다. 이 과정에서 귀추적 추론 과정과 사전 지식이 중요한 역할을 했다. Archimedes의 사례 이외에도 우리가 교과서를 통해 다루는 다양한 과학자들의 창의적인 발견 과정을 재구성할 수 있다면, 이러한 과정을 학생들이 경험하도록 교육의 단계를 제공함으로써 학생들이 창의적 사고 능력을 키워나갈 수 있을 것이다.

참고 문헌

강성주, 김현주, 이길재, 권영식, 김명희, 김연숙,

김윤화, 신호심, 임희영, 하지희 (2009). R&E 프로그램에 대한 과학영재고등학생들의 인식 연구. 한국과학교육학회지, 29 (6), 626-638.

강순희 (2011). 보통 학생들을 위한 창의적 문제해결력 지향 과학 교수 기법, 2011년 화학교육 여름호, 2-9.

교육인적자원부 (2001). 초등학교 교사용 지도서-과학 6-2-. 대한교과서 주식회사.

권용주, 심해숙, 정진수, 박국태 (2003a). 수중기 응결에 관한 초등학생들의 가설 생성에서 귀추의 역할과 과정. 한국지구과학회, 24 (4), 250-257.

권용주, 양일호, 정원우 (2000). 예비 과학교사들의 가설 창안 과정에 대한 탐색적 분석. 한국과학교육학회지, 20 (1), 29-42.

권용주, 정진수, 강민정, 김영신 (2003b). 과학적 가설 지식 생성 과정에 대한 바탕 이론. 한국과학교육학회지, 23 (5), 458-469.

권용주, 정진수, 박윤복, 강민정 (2003c). 선언적 과학 지식의 생성 과정에 대한 과학 철학적 연구. 한국과학교육학회지, 23 (3), 215-228.

김미선 역 (2009). 창의성 : 문제해결, 과학, 발명, 예술에서의 혁신. 서울: 시그마프레스, 149-150. [원저: Weisberg, R. W. (2005). Creativity: Understanding Innovation in Problem Solving, Science, Invention, and the Arts.].

김인목, 박홍이, 엄정인, 정광호 역 (2008). 수학 없는 물리, 제10판. 서울: 교보문고 [원저: Hewitt, P. G. (2007). Conceptual Physics, 10th Edition.].

노혜숙 역 (2003). 창의성의 즐거움. 서울: 북로드. [원저: Csikszentmihalyi, M. (1996). Creativity: flow and the psychology of discovery and invention.].

동완 역 (2006). 인간의 역사2. 서울: (주) 신원문화사. [원저: III' in, M. (1946). 인간은 어떻게 해서 거인(巨人)이 되었는가.].

문만용 (2009). 한국 근현대 과학사의 초등교육 활용 방안. 초등과학교육, 28 (2), 197-212.

박종원 (2000). 학생의 과학적 설명 가설의 생성 과정 분석: 과학적 가설의 정의와 특성을 중심으로. 한국과학교육학회지, 20 (4), 667-679.

백성혜 (2001). 아르키메데스는 무엇을 발견했을까? 화학교육, 28 (4), 60-67.

서혜애, 김순남, 조석희, 정현철 (2004). 영재교육 기관 평가 편람. 한국교육개발.

송진웅, 조숙경 역 (2007). 과학적 발견의 패턴. 서울: (주)사이언스북스. [원전: Hanson, N. R.(1958). Patterns of discovery: an inquiry into the conceptual foundations of science.].

양일호, 정진수, 권용주, 정진우, 허명, 오창호 (2006a). 과학자의 과학지식 생성 과정에 대한 심층 면담 연구. 한국과학교육학회지, 26 (1), 88-98.

양일호, 허명, 오창호, 황신영, 정진수, 권용주 (2006b). Charles Darwin의 자서전에 나타난 사고 과정 분석. 한국생물교육학회지, 34 (1), 53-7.

이경화, 성은현, 최병연, 박춘성, 전경원, 하종덕, 한순미 (2009). 초등학교 중학년의 창의성 교육 혁신 방안 연구. 창의력교육연구, 9 (2), 35-67.

이경화, 최병연 (2006). 초등학생의 발달단계에 따른 창의적 능력과 창의적 성격 및 영역 창의성 분석. 영재와 영재교육, 5 (2), 119-134.

이상욱 (2010). 과학자의 창조성은 어디에서 오는가, 과학기술의 철학적 이해 제 5판, 한양대학교 출판부.

이상욱 (2010). 토마스 쿤과 과학혁명의 구조, 과학기술의 철학적 이해 제 5판, 한양대학교 출판부.

이상욱, 백성혜 (2012). 보어의 원자모형과 아르키메데스의 금관문제. 2012년 한국과학철학회 정기학술대회 발표자료.

이선길 (2006). 고등학교 과학영재를 위한 사사 연구 (R&E) 프로젝트 학습모형의 개발과 적용. 이화여자대학교 대학원 박사학위논문.

이우영 역 (2006). 아르키메데스 그가 유레카를 외친 것 이외에 무엇을 했는가? 서울: 경문사. [원저: Stein, S. (1999). Archimedes: What Did He Do Besides Cry Eureka?].

임용 역 (2009). 창의성 그 잠재력의 실현을 위하여. 서울: (주) 학지사, pp.16 [원저: Sternberg, IR, J. (2004). Creativity: From Potential to Realization.].

전경원 (2000). 동·서양의 하모니를 위한 창의학. 서울: 학문사.

정현철, 한기순, 김병노, 최승언 (2002). 과학 창의성 계발을 위한 프로그램 개발. 한국지구과학학회지, 23 (4), 334-348.

조윤동 역 (2007). 되살아나는 천재 아르키메데

스. 서울: 일출봉.

조한혜정 (2009). 멋진 신세계와 판도라의 상자: 현대 과학 기술 낫설게 보기. 연세 과학 기술과 사회 연구 포럼. 문화과지성사.

홍갑주 (2008). 아르키메데스 수학의 교육적 연구. 서울대학교대학원 박사학위논문.

홍성욱 (2003). 과학적 창조성, 천재를 어떻게 이해 할 것인가. 계간과학사상, 2003여름.

황동주 (2010). 저울의 역사 탐구. 초암네트웍스.

Barron, F. (1988). Putting creativity to work. In Sternberg, R. J. (Ed.), The nature of creativity. New York: Cambridge University Press, 76-98.

Dunbar, K. (2000). How Scientists Think in the Real World: Implications for Science Education. Journal of Applied Developmental Psychology, 21 (1), 49-58.

Einstein, A. & Infeld, L. (1938). The evolution of physics. NYC: Simon & Schuster, 1938.

Getzels, J. W. & Csikszentmihalyi, M. (1976). The creative vision. New York: Wiley.

Giambattista, D. P. (1589). Magia Naturalis (Natural Magic). <http://math.nyu.edu/~corres/Archimedes/Crown/magick.html> (검색: 2011.3.22.).

Harwood, W. (2004). An activity model for scientific inquiry. The Science Teacher, 71 (1), 44-46.

Hennessey, B. & Amabile, T. (1988). Storytelling as a means of assessing creativity. Journal of Creative Behavior, 22 (2), 35-247.

Klahr, D. & Simon, H. (1999). Studies of scientific discovery: Complementary approaches and convergent findings. Psychological Bulletin, 125, 524-543.

Koestler, A. (1964). The Act of Creation. London: Hutchinson & Co.

Kuhn, T. S. (1970). The Structure of Scientific Revolutions. 2nd ed. The University of Chicago Press, Ltd. London.

Fermi, L. & Bernardini, G. (2003). Galileo

and the scientific revolution. New York: Dover Publications, Inc. [원저: Galilei, G. (1586). The little balance.].

Lawson, A. E. (2001). Promoting Creative and Critical Thinking Skills in College Biology, *Critical Thinking Skills*. Vol.27 (1). 13-22.

Lawson, A. E. (1995). Science teaching and the development of thinking. Belmont, CA: Wadsworth Publishing Company.

Mumford, M. D., Mobley, M. I., Uhlman, C. E., Reiter-Palmon, R. & Doares, L. M. (1991). Process analytic models of creative capacities. *Creativity Research Journal*, 4 (2), 91-122.

Ochse, R. (1990). Before the gates of excellence: The determinant of creative genius. New York: Cambridge University Press.

Osborn, A. F. (1948). *Your Creativity Power: How to use imagination* New York: Charles Scribner.

Osborn, A. F. (1953). *Applied Imagination*. New York: Charles Scribner.

Perkins, D. N. & Salomon, G. (1988). Are cognitive skills context bound? *Educational Researcher*, 18, 16-25.

Torrance, E. P. (1988) The Nature Of Creativity As Manifest In Its Testing, In Sternberg, R. J. (Ed.) *The Nature of Creativity*. Cambridge, England: Cambridge Univ. Press.

Toynbee, A. (1964). *Widening horizons in creativity*, New York: Wiley.

Vitruvius, P. (기원전 1세기). *The Ten Books On Architecture de Architectura LibriDecem*. <http://math.nyu.edu/~crorres/Archimedes/Crown/itruvius.html> (검색2011.3.22).

Wallas, G. (1926). *The art of thought*. London: Cape.