

지구과학의 한 탐구 방법으로서 귀추법에 대한 이론적 고찰

오필석* · 김찬종

이화여자대학교* · 서울대학교

A Theoretical Study on Abduction as an Inquiry Method in Earth Science

Oh, Phil Seok* · Kim, Chan-Jong

Ewha Womans University* · Seoul National University

Abstract: This was a theoretical study of which the goal was to provide a foundation for developing and implementing earth science inquiry activities based on abduction as a scientific inquiry method. Through a review of relevant literature, the study examined the nature of earth science in terms of the goals of earth science inquiry and the characteristics of what is investigated in earth science. It also explored the forms and meanings of abduction, thinking strategies used in the abductive inference, and the abductive inquiry model. Abduction is the process of inferring certain rules (e.g., scientific facts, principles, laws) and providing explanatory statements or hypotheses in order to explain some phenomena. This method was found to be well-suited to the earth science inquiry which studies the causes and processes of natural phenomena in the earth and space environment. Abduction has the nature of ampliative, selective, evaluative, and creative inference, and several thinking strategies, including reconstruction of data, heuristic generalization, analogy, existential, conceptual combination, and elimination strategies, are employed for inferring rules and suggesting hypotheses. This study found the abductive inquiry model to be adaptable to earth science classrooms, and it is therefore suggested that earth science instructions should be based on the abductive method and that research work concerning the abductive inquiry in the classroom should follow.

Key words: abduction, abductive inquiry, nature of earth science, earth science education

I. 서론

지난 수십 년간 과학 교육 분야에서 일관되게 강조되어 온 과학 교육의 목표들을 꼽아 본다면 거기에는 학생들이 ‘과학의 본성’(nature of science)을 바르게 이해할 수 있도록 해야 하며 이를 위하여 과학 교육 현장에서 ‘탐구로서의 과학’(science as inquiry) 혹은 ‘탐구를 통한 과학’(science by inquiry)이 강조되어야 한다는 것이 포함될 것이다(Bybee, 2000; Chiappetta & Koballa, 2002; DeBoer, 1991). 과학 교육에서 탐구를 강조하는 것은 기본적으로 과학 활동의 산물(product)로서 과학적인 지식과 함께 그러한 지식을 성취하기 위한 과학의 과정(process)에 대한 학습이 이루어져야 한다는 뜻을 담고 있다(Llewellyn, 2002;

National Research Council [NRC], 2000). 특히, 과학자들이 자연 세계를 연구하는 다양한 방법들을 의미하는 탐구는 과학의 본성을 잘 나타내는 것으로, 과학자들이 사용하는 방법을 이해하고 과학적인 아이디어에 대한 지식과 이해를 증진시키기 위한 학생들의 학습 활동 또한 과학적 탐구를 반영하여 이루어져야 한다는 것이 여러 과학 교육 개혁 운동에서 지속적으로 주장되어 오고 있다(American Association for the Advancement of Science [AAAS], 1990; NRC, 1996).

이렇듯 과학의 본질적 속성으로서 과학의 탐구 방법을 학교의 과학 수업에 반영해야 한다는 요구는 지구과학 교육에서도 예외가 될 수 없다. 즉, 지구과학 교육은 지구과학의 본성을 반영한 형태로 이루어져야 하며 지구과학 연구에서 활용되는 탐구 방법을 모델

*교신저자: 오필석(philoh@ewha.ac.kr)

**2005.1.10(접수) 2005.7.10(1심통과) 2005.8.5(2심통과) 2005.8.12(최종통과)

로 하는 교수-학습 방법들이 고안되고 수행되어야 한다. 지구과학의 탐구 방법은 크게 보아 귀납적(inductive), 연역적(deductive), 그리고 귀추적(abductive) 방법으로 구분할 수 있는데(Engelhardt & Zimmermann, 1982), 이 중에서도 귀추법(abduction)은 지구과학의 본질적 속성에 잘 부합하는 탐구 방법으로 여겨지고 있다. 귀추법은 “특정한 사실이나 법칙, 가설을 추론하여 어떤 현상이나 관찰 내용을 설명하거나 발견하는 과정”(Magnani, 2001, p. 17-18)을 뜻한다. 이 방법은 물상 과학이나 생물 과학에서도 사용될 뿐 아니라, 실험적으로 다루기 어려운 자연 세계를 대상으로 제한적인 정보를 통해 현상에 대한 원인을 추정하고 현재의 지구 환경이 오랜 시간 동안 어떤 과정을 통해 형성되었는지 설명하는 것을 주된 활동으로 하는 지구과학에서 매우 빈번히 활용되고 있다(Engelhardt & Zimmermann, 1982; Kim, 2002). 지금까지 귀추법에 대한 연구는 과학 철학이나 인지 과학, 인공 지능 등과 같은 학문 분야에서 활발하게 진행되어 왔으며, 최근에는 국내외의 과학교육 연구자와 지구과학자, 지구과학 교육자들의 관심의 대상이 되고 있다(권용주 등, 2003a, b, c; 박종원, 2000; Clement & Oviedo, 2003; Engelhardt & Zimmermann, 1982; Kim, 2002, 2003; Oh, 2004).

이상과 같은 지구과학의 본성을 반영한 지구과학 교수-학습이라는 교육적 요구와 귀추법에 대한 최근의 관심을 고려하여 본 연구에서는 지구과학의 본질적 속성에 대해 고찰하고 지구과학의 한 탐구 방법으로서 귀추법에 대해 논의해 보고자 한다. 특히, 이 연구는 지구과학 교육 현장에서 귀추법을 토대로 한 탐구 활동을 고안하고 수행하는 기초를 마련하기 위한 이론 연구로서 지구과학 교육뿐만 아니라 귀추법을 다루고 있는 과학 철학 및 과학사, 인공 지능과 인지 과학 분야의 관련 문헌들을 탐색하여 종합하는 문헌 연구의 방법으로 이루어졌다. 본 연구에서 귀추법과 관련하여 주된 고찰의 대상이 되었던 문헌들은 다음과 같다.

- 지구과학 및 지구과학 교육 관련 문헌: Engelhardt & Zimmerman, 1982; Kim, 2002, 2003; Laudan, 1987; Lawson, 1995; Selles-Martinez, 2004
 - 과학철학 및 과학사 관련 문헌: Curd, 1980; Hanson, 1958, 1961, 1971; Kordig, 1978; Nickles, 1980; Snyder, 1997
 - 인지 과학 및 인공 지능 관련 문헌: Magnani, 2001; Psillos, 2000; Thagard, 1988, 1992
- 이어지는 본문에서는 먼저 지구과학의 본성을 지구

과학 탐구의 목적과 지구과학 탐구 대상의 특징이라는 측면에서 고찰하고, 귀추법의 형식과 의미, 귀추법과 관련된 사고 전략들을 지구과학의 맥락에서 논의한다. 또, 지구과학 수업에서 활용할 수 있는 귀추적 탐구 모형을 살펴보고, 지구과학 교사들과 지구과학 교육 연구자들에게 주어진 앞으로의 과제를 차례로 제시하도록 한다.

II. 지구과학의 본성: 지구과학 탐구의 목적 및 지구과학 탐구 대상의 특징

지구과학은 “우리가 살고 있는 지구와 우주의 제반 자연 현상을 통합적으로 탐구하는 학문”(최승언, 1998, p. 2412)으로서 시간적으로는 우주의 기원에서부터 미래까지, 공간적으로는 지구의 중심부에서 우주 끝까지의 범위를 탐구의 대상으로 하고 있다. 이렇듯 지구과학은 다양한 자연 현상을 통합적으로 다루기 때문에 다른 과학 분야와 구별되는 독특한 특징을 지니고 있는데, 그러한 지구과학의 본질적 속성을 이해하기 위해서는 먼저 지구과학 탐구의 목적을 분명히 인식할 필요가 있다. Laudan(1987)에 따르면, 지구과학 탐구의 목적은 크게 두 가지로 구분된다. 하나는 역사학적(historical) 탐구이며 다른 하나는 인과적(causal) 탐구이다. 먼저 역사학적 탐구에서는 지구과학자들이 지구나 우주가 어떤 과정을 거쳐서 현재에 이르게 되었는지 밝혀내는 것을 주요 목적으로 삼는다. 연구의 결과는 과거 어느 시점에서 일어난 사건들의 순서를 서술하는 연대기를 알아내는 것으로, 이러한 역사학적 탐구에서는 왜 그러한 순서로 사건이 일어났는지와 같은 인과적인 측면은 일차적인 관심이 아니다. 하지만, 지구과학자들은 또한 지구에서 일어났거나 일어나고 있는 현상의 원인을 밝혀 내고자하는 연구, 즉 인과적인 탐구를 수행한다. 예를 들어, 퇴적학자들은 퇴적 분지의 지층과 지질 구조를 조사하여 퇴적 당시에 하천이 흐른 방향이나 공급된 퇴적물의 기원, 퇴적 분지가 형성되는 지구조 운동, 이후에 발생한 지각 변동 등 현재의 모습이 이루어지게 된 과정을 추론한다. 그런데, 지구과학의 탐구를 통해 추정된 어떤 현상의 원인들은 다른 과학 분야에서 제공하는 인과적 법칙과 같은 법칙적인 필연성(nomological necessity)의 조건을 만족시키지 못하는 경우가 많다. 예컨대, 지구과학의 탐구에서는 어떤 현상이 일어나기 위한 모든 조건들을 밝혀내기 어려운 경우가 많고, 원인과 결과의 관계를 설득력 있게 제시할 수 있는 범위 내에서 어떤 하나의 사건이나 사건들의 복잡한 상호작용을 원인으로

로 선택할 수 있을 뿐이다(Engelhardt & Zimmermann, 1982). 따라서, 지구과학의 인과적 탐구는 기계적 인과성(mechanical causality)을 추구한다기 보다는 지구과학적 현상에 대한 최선의 인과적 설명(causal explanation)을 구성하는 것을 목표로 하고 있다고 보아야 한다. 또한, 그러한 인과적 탐구는 시간적인 연속성에 대한 주장을 제공하는 역사학적 탐구와 독립적으로 수행된다기 보다는 역사학적 탐구와 서로 상호보완적으로 이루어진다고 할 수 있다.

위에서 서술한 바와 같은 지구과학 탐구의 특징은 지구과학에서 다루는 탐구 대상의 특징들에 크게 기인하는 것이다. 즉, 지구과학의 본질적 속성은 지구과학 탐구에서 다루는 대상들이 지니는 특징을 이해함으로써 보다 잘 파악될 수 있다. 지구과학 탐구 대상의 특징과 관련하여 Kim(2002)은 지구과학에서 다루는 현상들의 특성을 거대한 시·공간 규모, 접근불가능성(inaccessibility), 통제불가능성(uncontrollability), 복잡성 (complexity) 등으로 설명하였고, Selles-Martinez (2004)는 지구과학 탐구의 특징을 인지적(cognitive) 관점과 학문적(disciplinary) 관점에서 논하고 이에 따라 지구과학 수업 및 평가에서 고려할 점들을 제안하였다. 또한, 이들에 앞서 Engelhardt와 Zimmermann (1982)은 지질학의 실제 사례들을 중심으로 지구과학 연구 방법들의 특성을 과학철학적 견지에서 고찰한 바 있다. 이들의 논의를 종합하여 지구과학 교육에서 고려되어야 할 지구과학 탐구 대상의 특징들을 제시하자면 다음과 같이 정리해 볼 수 있다.

첫째, 지구과학의 탐구에서는 과거와 현재, 그리고 미래에 이르는 오랜 시간 규모 동안 발생하는 현상들과 과정들을 다룬다. 예컨대, 지구과학에서는 과거 46억 여년간의 지질 시대를 통해 남겨진 지질학적 기록들을 연구할 뿐만 아니라 지구의 온실 효과의 증대로 인한 온난화 경향 등 미래의 지구 환경 문제를 다룬다. 그런데, 이러한 현상들의 원인이 되는 지구과학적 과정들 중에는 현재에도 계속 진행 중인 것들이 있는 반면, 과거의 어느 시점에서 종결되어 현재에는 그 결과의 일부만이 남아 있는 것들도 있다. 따라서, 지구과학에서는 남아 있는 증거들로부터 출발하여 관찰된 결과들이 어떤 원인으로 인해 만들어진 것인지, 지금과 같은 지구 환경은 어떤 과정을 통해 형성되었는지를 추론함으로써 지구의 역사를 재구성하는 것이 중요한 탐구 목표 중의 하나가 된다(Engelhardt & Zimmermann, 1982; Selles-Martinez, 2004).

둘째, 지구과학적 현상들은 다양한 규모에서 발생하는 여러 가지 과정들이 복합적으로 작용한 결과로 나

타날 수 있다. 예를 들어, 저위도 지역에서의 화산 폭발은 지구 규모의 기후 변화에 영향을 미칠 수 있으며, 수십 킬로미터의 규모에서 발생하는 조산 운동(oro-genic contraction)은 광물의 결정에 생기는 수 밀리미터 규모의 흠집(fraction)을 동반할 수 있다(Selles-Martinez, 2004). 따라서, 남아있는 지질학적 기록들로부터 과거에 발생하였던 지구과학적인 과정들을 가늠하거나 현재 밝혀진 사실들로부터 미래의 일어날 변화들을 예측하기 위해서는 지구 환경에 영향을 미칠 수 있는 다양한 과정들을 생각해야 하고 발생 가능한 사건들을 다각도로 모색해 보아야 한다. 다시 말하여, 지구과학의 탐구를 효과적으로 수행하기 위해서는 엄격한 형식 논리를 따라서 추론하기보다는 관련된 여러 가지 요인들과 그들의 역동적인 관계를 고려하는 시스템적(systemic) 사고가 요구된다고 할 수 있다(Kim, 2003; Selles-Martinez, 2004).

셋째, 지구과학 탐구에 이용되는 증거나 정보는 제한적이며 부분적인 경우가 많다. 이것은 다시 몇 가지 중요한 지구과학의 특성들에 기원하는데, 먼저 지구과학적 현상들과 과정들에 대한 접근이 용이하지 않다는 점을 들 수 있다. 예컨대, 지구 내부나 심해저에서 일어나는 사건들을 직접적으로 경험하는 것은 불가능하고, 화산이나 지진과 같은 현상들도 그 발생 과정을 모두 관찰할 수는 없는 일이다. 또한, 모든 과정들의 결과가 지구 환경에 기록되지는 않을 뿐더러, 기록된 정보들조차도 기후의 변화, 풍화, 변성 작용 등에 의해 시간이 지남에 따라 소멸한다는 사실도 지구과학에서 이용되는 증거나 정보가 제한적일 수밖에 없는 이유이다. 이와 더불어, 지구과학에서 다루는 대상들은 실험실 상황에서 재연하기 어려운 경우가 많다. 예를 들어, 지구과학자들이 일식이나 운석의 대기권 진입과 같은 사건들을 그대로 재연할 수 있는 방법은 알려져 있지 않다. 따라서, 지구과학의 탐구에서는 제한적이고 부분적인 증거와 정보로부터 최선의 설명을 구성하기 위한 창의적인 사고가 필수적으로 요구된다(Engelhardt & Zimmermann, 1982; Kim, 2002; Selles-Martinez, 2004).

이상과 같은 지구과학 탐구의 특징들은 지구과학에서는 귀납법이나 연역법, 실험적 방법들 뿐만 아니라 귀추적 방법을 사용한 연구가 중요한 역할을 하고 있음을 암시해 주는 것이다. 이에, 다음에서는 귀추법을 모델로 한 지구과학 교수·학습 방법을 모색하는 이론적인 기초를 제공하기 위하여 귀추법의 형식과 의미에 대해 논의하고, 귀추법과 관련된 사고 전략들을 살펴 본 후, 귀추적 탐구 모형에 대해 차례로 고찰해 보

기로 하겠다.

III. 귀추법의 형식과 의미

귀추법은 19세기의 철학자 Charles S. Peirce에 의해 귀납법이나 연역법과 다른 또 하나의 추론 방법으로 제안된 이래(Goudge, 1950), Hanson(1958, 1961, 1971)에 의해 보다 정교한 형태로 제시되었고, 이 후에 과학철학이나 인지 과학과 같은 다양한 분야에서 연구되어져 왔다. 따라서, 귀추법을 이해하기 위해서는 다른 추론 형태와 대비되는 귀추법의 특징을 파악하고, Hanson의 견해를 따라 귀추법의 형식과 의미를 좀 더 자세히 살펴보는 일이 우선 필요하다. 먼저, 귀추법은 삼단논법의 형식을 따라 연역법과 비교했을 때 다음과 같은 형태를 지닌다.

	연역법		귀추법
(rule)	$A \rightarrow B$	(result)	B
(case)	A	(rule)	$A \rightarrow B$

(result)	$\therefore B$	(case)	$\therefore A$

위와 같은 논리적 구조가 암시하는 바와 같이, 연역법에서는 결론의 진실성이 그 결론을 이끌어 내는 데 토대가 되었던 전제들의 진실성 여부에 의해 결정된다. 즉, 타당하게 진행된 연역적 추론에서는 전제들이 참일 경우 그로부터 도출되는 결론은 반드시 참일 수밖에 없고, 이 때문에 연역법은 엄격한 논리적 조건(strict sense of logic)을 만족시키는 논증 방법으로 여겨져 왔다. 반면, 귀추법에서는 주어진 전제들이 결론의 타당성을 부분적으로 지지할(partial support) 수 있을 뿐이다. 왜냐하면, 귀추법은 $A \rightarrow B$ 라는 규칙(rule)에서 필요조건 B가 주어졌을 때 충분조건 A를 B에 대한 설명적 진술(explanatory statement)로 제시하는 것이기 때문이다. 따라서, 귀추법은 엄격한 논리적 형식을 갖추었다고는 보기 어렵고, 전제들이 결론을 부분적으로 지지하는 상황에서 결과적으로 전제들이 논리적으로 보장할 수 있는 내용을 넘어서는 결론을 도출하게 한다는 점에서 확장적인(ampliative) 추론 방법이라고 할 수 있다(Magnani, 2001; Psillos, 2000).

이렇듯 귀추법은 형식 논리의 관점에서는 타당하지 않음에도 불구하고, 과학자들이 어떤 현상을 관찰하고 특정한 규칙을 통하여 그 현상의 원인을 추정하거나 현상을 설명하고자 할 때에 효과적으로 기능할 수 있다. 이러한 귀추적 추론의 기능을 지구과학의 예에 적

용하여 연역적인 추론과 비교, 설명하자면 다음과 같다. 먼저, 연역법의 경우, 지구과학자들은 다음과 같이 추론할 수 있다(Engelhardt & Zimmermann, 1982, p. 82).

1. 55 kbar 이상의 압력과 1000 °C 이상의 온도에서 산소가 없을 때에 탄소는 다이아몬드로 바뀐다. (A → B)
2. 어떤 실험에서 탄소에 80 kbar의 압력과 1200 °C의 온도가 가해진다. (A)
3. 이 실험에서는 다이아몬드가 만들어 질 것이다. (B)

이와는 대조적으로 귀추법을 적용하였을 때는 다음과 같은 추론이 가능하다(Engelhardt & Zimmermann, 1982, pp. 81-82).

1. 남아프리카의 화도(volcanic pipes)에서 다이아몬드가 발견되었다. (B)
2. 다이아몬드는 오직 탄소로부터 만들어지며 온도가 적어도 1000 °C에 달하고 압력이 적어도 55 kbar일 때 탄소가 다이아몬드로 합성된다. (A → B)
3. 화도가 형성될 당시 압력이 적어도 55 kbar에 이르는 심부에서 형성된 [다이아몬드를 비롯한] 물질들이 위로 옮겨 왔을 것이다. (A)

이상과 같이, 연역법은 잘 확립된 법칙과 주어진 조건으로부터 그에 따르는 필연적인 결과를 예측할 수 있게 하는 반면, 귀추법은 과학적 사실이나 원리, 법칙 등을 규칙으로 삼아 어떤 현상의 원인을 제공함으로써 주어진 현상을 설명할 수 있도록 해 준다. 그런데, 귀추법의 특징을 이해하고자 할 때는 어떤 현상을 설명하는 데 규칙으로 활용될 수 있는 사실이나 원리, 법칙들이 매우 다양하게 존재하고, 따라서 현상에 대한 설명 또한 여러 가지가 있을 수 있다는 점에 주의할 기울일 필요가 있다. 마찬가지로 이유로, 귀추적 추론에 의해 제시되는 결론은 확정적이거나 과학자 사회에서 최종적으로 승인된 것이 아니라 현상에 대한 임시적인 설명, 즉 가설(hypothesis)의 지위를 갖는다는 사실을 기억할 필요가 있다. 예를 들어, 신생대 때에 거대 육식 동물들이 멸종한 사건에 대해서는 지구의 기후 변화가 초래한 생태의 변화 또는 인류에 의한 대규모의 사냥 행위 등 서로 다른 여러 가지 설명적 가설(explanatory hypothesis)들이 그 원인으로 제시될 수 있다(Guthrie, 1984; Martin, 1984). 따라서, 현상을 설명하기 위하여 실제로 추론을 진행하는 상황에서 과학자들은 가능성 있는 다양한 규칙들을 검

토하고 그 중에 가장 설득력 있는 설명을 제공해 줄 수 있다고 믿어지는 규칙들을 선택하는 과정을 거치게 된다. 이 점에서 귀추법은 여러 가지 대안적인 규칙들 중에서 가장 유력한 것을 선정하여 주어진 현상을 설명하는 선택적(selective) 추론 방법이라고도 불리 운다(Magnani, 2001).

귀추법은 과학자들이 기존에 알려진 규칙들을 통해 잘 설명되지 않는 현상을 접하게 되었을 때 새로운 규칙을 창안함으로써 그 현상을 설명하는 과정에서도 중요한 역할을 한다. 이 때 과학자들에 의해 창안되는 규칙은 현상에 대한 새로운 설명적 가설을 포함하게 되는데, 이 점에서 Hanson은 귀추법이 과학자들이 가설을 제안하는 방법이라고 주장하고, 그 형식을 다음과 같이 제시하였다(Hanson, 1958, p. 86).

1. 어떤 놀라운 현상(surprising phenomena) P 가 관찰된다.
2. 만일 H 가 참이라면, P 는 당연한 것으로(as a matter of course) 설명될 수 있다.
3. 따라서, H 가 참이라고 생각할 [좋은] 이유가 있다.

위에서 알 수 있는 바와 같이, 귀추법은 과학자들이 ‘놀라운’ 현상을 지각하는 것으로부터 시작된다. 현상이 놀랍다는 것은 관찰자에 의해 이미 어떤 종류의 판단이 행해졌음을 의미한다. 즉, 과학자들은 놀라운 현상을 자신이 해결해야 할 문제, 말하자면 이상 현상(anomaly)으로 인식하며, 새로운 규칙을 생성함으로써 문제의 해결을 시도한다. “어떤 전제들로부터 이러한 이상 현상이 초래되는 것처럼 보일 수 있는가?”(Hanson, 1971, p. 66)라는 것이 과학자들의 귀추적 사고를 이끌어 가는 질문이 되는 것이다. 위에서 제시한 귀추법의 형식을 Hanson(1958)이 과학적 사고의 전형이라고 극찬하였던 Kepler가 타원 궤도의 법칙에 이르는 과정에 적용해 보자면 다음과 같다.

1. 관찰된 화성(Mars)의 위치들에 따르면 화성의 공전 궤도는 원과 달걀형의 중간이다.
2. 만일 화성의 궤도가 타원이라면, 당연히 화성의 위치들은 원과 달걀형의 중간에 위치할 것이다.
3. 따라서, 화성의 궤도가 타원이라고 생각할 좋은 이유가 있다.1)

Hanson은 Kepler가 화성의 궤도가 타원이라는 가설로부터 시작하여 관측을 통해 확인될 수 있는 사실들을 연역해 낸 것이 아니라고 바르게 지적한다. 오히려 Kepler는 행성에 대한 관측 자료로부터 거슬러 올라가서 타원 궤도의 가설에 이르게 된 것이다. 하지만, 이러한 견해는 타원 궤도의 법칙을 관측 자료를 귀납적으로 종합한 결과로 보려는 베이컨적 전통(Baconian tradition, Braigrie, 1990)과는 구별된다. Hanson에 따르면, 과학적 법칙이 자료들의 단순한 요약이라는 귀납적 관점은 잘못된 것이다. 과학적 법칙은 자료들에 의한 설명으로서, 통계적 종합에 지나지 않는 단순한 귀납적 추론에서는 설명적 가설이 등장할 수 없고 그것은 귀추적 추론을 통해서 가능하다는 것이다. Hanson의 입장은 또한, 과학 활동을 ‘발견의 맥락’(context of discovery)과 ‘정당화의 맥락’(context of justification)으로 구분하고 과학자들이 처음 가설을 제안하는 과정, 즉 발견의 과정을 심리학이나 사회학의 영역으로 취급하여 과학철학의 관심 밖에 두고자 하는 가설-연역론자들이나 반증주의자들의 관점(Popper, 1959; Chalmers, 1982 참조)과도 구별된다. Hanson은 단순한 귀납적 추론이 부정된 경우라도 어떤 유형의 합리적(rational) 추론이 현상으로부터 설명에 이르는 과정에 개입하고, 그러한 사고 과정은 Kepler의 예에서 보듯이, 귀추적 추론이라고 주장한다. 이 점에서 귀추법은 종종 과학자들이 처음 가설을 상정하는 데 동원하는 ‘발견의 논리’(logic of discovery) 혹은 ‘가설 유도 추리’라고 불리기도 한다(Nickles, 1980; 소흥렬, 1991). 물론, Hanson이 가설-연역적 방법 자체를 부정하는 것은 아니다. 오히려, 귀추적 방법에 의해 제안된 가설들은 가설-연역적 방법과 실험적인 방법 등에 의해 더욱 진지하게 탐구됨으로써 과학적인 법칙으로 정당화될 수 있다. Hanson에게 있어 가설-연역론자들이 옳지 못한 것은 그들의 사고의 출발점인 가설이 어떻게 고안되었는가에 대해서 침묵하고 있다는 것이다(Hanson, 1961). 정리하여 말하자면, Hanson에 의해 제안된 귀추법은 놀랄만한 현상으로부터 출발하여 새로운 규칙을 형성하고, 그 규칙 속에 함의된 가설을 다음 단계의 과학적 탐구의 대상으로 제안하는 추론 방법이라고 할 수 있다.

그런데, 이상과 같은 귀추법에 관한 Hanson의 초기 주장은 과학철학자들에 의해 비판을 받기도 하였다(Hanson의 견해와 그에 대한 비판을 종합적으로 다루

1) 예시된 추론 과정은 $H \rightarrow P$ 라는 규칙에서 H 를 P 에 대한 설명적 가설로 제안하는 형식을 갖추고 있다. 그러나, 경우에 따라서는 H 가 $a \rightarrow b$ 라는 규칙의 형태를 내포하는 것이 가능한 것처럼 보인다. 즉, 이 예에서 H 는 ‘만약 관찰된 행성이 화성이라면 그 궤도는 타원이다’라는 규칙의 구조로 세분할 수 있다.

고 있는 저작으로는 Nickles, 1980을 참조). 그러한 비판들 중에는 하나의 가설을 처음 제안하는 이유와 그 가설을 최종적으로 받아들이는 이유가 다르지 않다는 지적이 포함되어 있다. 즉, 발견의 맥락에서 귀추적 추론을 통해 최초로 상정된 가설은 그것의 출발점이 되었던 현상에 대한 설명력을 근거로 다음 단계의 과학적 탐구의 대상이 되는데, 어떤 가설의 설명력은 정당화의 맥락에서 그 가설을 과학적인 법칙으로 승인하는 데에도 마찬가지로 좋은 이유(good reason)가 될 수 있다는 것이다. 이러한 비판을 수용한 Hanson은 수정된 형식의 귀추적 방법을 과학자들이 만유인력 법칙을 탐구하게 되었던 과학사적 사례와 함께 다음과 같이 제안하였다(Hanson, 1961, p. 407).

1. 어떤 놀라운(surprising), 깜짝 놀랄만한(astonishing) 현상들 P_1, P_2, P_3, \dots 가 관찰된다.
2. 그런데, P_1, P_2, P_3, \dots 는, H 유형의(of H 's type) 가설이 채택된다면, 놀라운 것이 되지 않을 것이다. 즉, 그것들은 H 와 같은 어떤 가설로부터 당연한 일이 되고 H 와 같은 어떤 가설에 의해 설명된다.
3. 따라서, H 유형의 가설을 더욱 탐구할(elaborating) 좋은 이유가 있다. 즉, H 유형의 가설을 P_1, P_2, P_3, \dots 을 설명할 수 있는 가설로서 제안할 좋은 이유가 있다.

1. 모든 행성들의 궤도가 타원이라는 깜짝 놀랄만한 발견이 케플러에 의해 이루어졌다.
2. 그런데, 제곱에 반비례하는 형태의 다른 법칙들과 더불어 중력의 법칙이 채택된다면, 이와 같은 궤도는 놀라운 것이 되지 않을 것이다. 즉, 케플러의 제 1 법칙은 당연한 것이 될 것이다. 그러한 종류의 가설은 더구나 행성들이 불균일한 속도로 운행하는 궤도가 왜 타원인지를 설명할 수 있다.
3. 따라서, 이러한 유형의 가설들에 대해 더욱 탐구할 좋은 이유가 있다.

이렇게 수정된 형식의 귀추법은 과학자들이 놀라운 현상을 설명하기 위하여 하나의 규칙만을 염두에 두기보다 비슷한 유형의 여러 가지 규칙들을 생각할 수 있음을 보여 준다. 그렇다면, 과학자들이 다양한 규칙들로부터 여러 가지 대안적인 가설들을 탐구의 대상으로 제안하는 이유는 그것들이 여러 가지 검증 과정을 거친 후에 특정한 하나의 가설이 최종적으로 정당

화하는 이유와 같지 않을 수 있다. 또한, 수정된 형식의 귀추법은 가설을 제안하기 위한 과학자들의 사고 과정 중에는 가능성 있는 다양한 규칙들을 탐색하여 잘못된 유형(wrong type)의 규칙과 그에 따른 가설을 배제하는 전략이 포함되어 있음을 말해 준다. Hanson(1961)에 따르면, 이렇게 잘못된 유형의 것들을 배제하는 방식의 추론이 항상 가설-연역적인 것이 아니며, 귀추적 방법에도 잘 부합된다고 한다. 따라서, 귀추법은 과학자들이 지각한 놀라운 현상을 설명하기 위하여 새로운 규칙을 형성하는 창조적인(creative) 속성과 여러 가지 대안적인 규칙들을 비교하여 가장 설득력 있는 설명적 가설을 제안해 줄 수 있는 것을 선택하는 평가적(evaluative) 속성을 함께 지닌다고 할 수 있다(Magnani, 2001; Psillos, 2000).

이상과 같은 귀추법의 형식과 의미를 종합해 볼 때, 귀추법은, Magnani(2001)가 정의하는 바와 같이, 어떤 현상을 설명하기 위하여 특정한 규칙을 추리해 내고 그 속에 포함되어 있는 설명적 진술 또는 설명적 가설을 제안하는 과정이라고 말할 수 있다. 또한, 귀추법은 어떤 현상으로부터 그것을 설명하기 위한 진술로 진행되는 확장적 추론임과 동시에, 설명적 진술이나 가설을 이끌어 내기 위해 활용할 수 있는 다양한 규칙들 중에서 가장 설득력 있는 것을 결정한다는 의미에서 선택적, 평가적이며, 놀라운 현상을 다루기 위하여 새로운 규칙을 형성할 수 있다는 점에서 창조적인 특성을 함께 지니고 있음을 알 수 있다.

IV. 규칙 추리와 가설 제안 과정에 사용되는 사고 전략들

Hanson(1958, 1961)은 귀추법이 놀라운 자료로부터 그 자료에 대한 설명으로 진행되는 사고 과정으로서 과학자들이 새로운 가설을 보다 진지한 탐구의 대상으로 제안하는 이유를 제공해 준다고 주장하였다. 하지만, 귀추법은 Hanson이 의도한 바와는 달리 과학자들이 어떻게 새로운 가설을 함의하고 있는 규칙에 이르게 되는가를 구체적으로 설명하지 못한다는 비판을 받아 온 것 또한 사실이다. 예컨대, Gutting(1980)은 Hanson이 귀추적 추론의 논리적 형식에 지나치게 집착함으로써 과학적인 가설에 이르는 과정을 인도하는 방법론적 규약이나 발견법적 원리 등을 소홀히 다루고 있다고 비판하였다. 또한, 정상모(1993)는 귀추법과 같은 확장적인 추론이 탐구의 논리로서 의미를 얻기 위해서는 발견법적이거나 전략적인 요소가 중요하다고 하였고, 이훈(1989)은 귀추법이 실질적인 발견

의 지침을 제공하기 위해서는 귀추법을 수행하는 전체적인 전략, 혹은 방법적 원리가 반드시 필요하다고 지적하였다. 특히, 귀추법이 과학적 탐구 방법으로서 학생들을 위한 탐구 활동을 설계하는 데 유용한 시사점을 제공해 주기 위해서는 특정한 규칙을 추리하여 새로운 설명적 가설을 제안하는 과정에서 사용되는 발견법적인 사고 전략들을 보다 구체적으로 살펴 볼 필요가 있다(Oh, 2004).

과학자들이 특정한 규칙을 추리하여 새로운 설명적 가설을 제안하는 과정에 여러 가지 사고 전략들이 동원되고 있다는 데에는 많은 연구자들이 동의하고 있는 것처럼 보인다. Peirce는 일찍이 귀추란 “이론이나 개념을 낳게 하는 모든 조작(operation)”(Goudge, 1950, p. 195)이라고 하여 귀추법을 매우 넓은 의미로 사용한 바 있으며, Psillos(2000) 역시 귀추법을 확장적 추론의 기본 형식으로서 열거적 귀납(enumerative induction)과 같은 전략들을 포함하는 포괄적인 추론 과정으로 보아야 한다고 주장하였다. 또, Snyder(1997)는 행성의 운행에 관한 Kepler의 탐구를 사례로 들어 단순한 귀납법과는 다른 사고 전략들이 과학자들이 새로운 규칙을 창안하는 과정에 사용되고 있음을 보여 주었으며, 권용주 등(2003b)은 그들의 경험적인 연구에서 피험자들의 가설 생성 과정을 5개의 단계로 구분하고 그러한 과정은 귀납적이고 연역적인 추론이 함께 관여하는 복잡한 사고 과정임을 밝혀내었다. 이에 더하여, Magnani(2001)와 Thagard(1988, 1992)는 과학철학, 인지 과학, 인공 지능 등에 관한 광범위한 연구를 통하여 귀추법을 여러 가지 유형의 전략으로 세분화하여 제시하기도 하였다.

이와 같은 연구 결과들은 규칙 추리와 가설 제안 과정에 동원되는 다양한 사고 전략들을 구체적으로 제시함으로써 귀추법의 성격을 보다 명확히 이해하고 나아가 귀추적 탐구 방법을 과학 교육에 응용하는 데 도움을 줄 것으로 판단된다. 이 점을 고려하여, 본 연구에서는 귀추법을 어떤 현상을 설명하기 위하여 특정한 규칙을 추리해 내고 그 속에 포함된 설명적 진술이나 설명적 가설을 제안하는 과정이라는 포괄적인 의미로 정의하고²⁾, 여러 연구자들에 의해 제시된 것들을 바탕으로 과학자들이 특정한 규칙을 추리하여 가설을 제안하는 과정에 동원하는 사고 전략들을 지

구과학의 맥락에서 살펴보기로 한다. 아래에서 고찰되는 전략들을 이해하기 위해서는 그들 전략들이 귀추적 사고 과정에서 단독적으로 혹은 독립적으로 사용되는 것이 아니라 추론의 전 과정에서 복합적으로 활용될 것이며 그 양상은 문제가 터한 맥락이나 탐구의 상황에 따라 달라질 수 있다는 점이 먼저 고려되어야 할 것이다. 또한, 다음에 열거되는 것들은 귀추적 추론에 동원되는 사고 전략들의 일부에 해당하고, 더욱 다양한 전략들이 실제 과학자들의 연구와 학생들의 탐구 활동에서 사용될 것이라는 점을 염두에 둘 필요가 있다.

1. 자료의 재구성(reconstruction) 전략

귀추적 추론 과정에서 과학자들은 특정한 사실이나 원리, 법칙 등을 규칙으로 선택하고 그것을 통하여 자료를 설명하게 된다. 이를 달리 표현하면, 귀추법은 주어진 자료를 “그것보다 상위 차원의 집합이나 구조나 속성에 귀속시키게 하는 추리”(소홍렬, 1991, p. 140)라고 할 수 있다. 이러한 귀속시키는 추리가 가능하기 위해서는 과학자가 답하려고 하는 문제에 적합한 형태로 자료들이 제공하는 낱말의 정보들을 재배열하거나 추론자의 탐구적 관심에 따라 주어진 자료들 속에 내재된 증거들을 선별하는 등 자료들에 대한 재구성(reconstruction) 작업이 필요하다. 다음과 같은 지구과학적 사례가 이에 대한 좋은 예가 될 수 있다(Engelhardt & Zimmermann, 1982, p. 213).

방사성 붕괴의 법칙을 이용하여 ... 암석과 광물에서 발견된 리튬, 스트론튬, 포타슘, 알곤 동위 원소의 양을 토대로 그들 암석과 광물이 거쳐 온 지질 시대의 사건들을 재구성하였다. 즉, 어떻게 오늘 현재 발견되는 것과 같은 동위 원소의 비율을 갖게 되었는가에 대한 귀추적인 설명을 이용하여 암석들을 탄생시켰던 사건들의 순서를 추론한 것이다. 여기서 말하는 사건들이란 마그마가 특정한 시점에서 화강암으로 굳어진 일, 알프스 조산 운동과 변성 작용이 일어나는 동안 암석들이 가열되고 냉각되어 발생한 상변화 등을 말한다. 그런데, 암석과 광물 표본 속에 포함된 동위 원소에 대한 설명은 그것이 알프스 지역의 지구과학적 역사의 단편들을 재구성하는 데 관련 있는 자료들을 제공하는 경우에만 저자의 관심을 끌었을 뿐이다. 따라서, 조사된 표본의 숫자는 제한되어 있었고, 그들에 대한 분석은 저자가 의도한 귀추에 충분하다고 생각되었을 때 바로 중단되었다.

2) 사실 귀추법을 어느 정도로 넓은 의미로 볼 것인가 하는 문제는 귀추법에 관련된 여러 문헌들에서 여전히 해결해야 할 과제로 남아 있다. 본 연구에서는, 본문 중에 언급한 바와 같이, 귀추법을 현상을 설명하기 위하여 규칙을 추리하고 새로운 가설을 제안하기 위한 전략들을 포함하는 포괄적인 추론 과정으로 파악하였다. 이 점에서 본 연구는 귀추법을 가장 유력한 설명적 가설을 낳게 하는 확장적 추론의 기본 형태로서 귀납을 포함하는 넓은 의미의 설명적 사고 과정으로 보려는 Psillos(2000) 등과 같은 연구자들의 관점과 맥을 같이 한다. 하지만, 귀추법의 범위에 관한 이슈들을 좀 더 깊이 있게 다루지 못한 것은 본 연구가 지니는 제한점이다.

이와 같이, ‘자료의 재구성’ 전략은 과학자들이 탐구 문제를 해결하기 위해 필요하다고 이미 알고 있거나 염두에 두고 있는 규칙들을 쉽게 추리해 낼 수 있도록 정보를 재배열하거나 증거를 선별하는 전략이라고 할 수 있다. 특히, 귀추적 추론의 출발점으로서 주어진 현상들에 대해 모종의 조작(manipulation)을 취하는 것은 지사(earth history)를 엮는 데 필요충분한 정보가 온전한 형태로 제공되지 않는 지구과학 탐구의 맥락에서는 보편적인 일이다(Kim, 2002). 이런 까닭에 지구과학자들이 귀추적 추론을 수행하면서 지구 환경을 설명하기 위하여 어떤 사실이나 원리, 법칙 등을 규칙으로 선택하는 과정은 수동적이라기보다 자료 자체에 대한 재구성을 포함하는 상호작용적이고 창조적인 과정이라고 할 수 있다.

2. 발견법적 일반화(heuristic generalization) 전략

지구과학에서 귀추법에 의해 설명적 진술을 이끌어 내는 것은 현재 널리 받아들여지고 있는 이론들에 힘입어 이루어질 수도 있지만 추론자가 새로운 규칙을 형성함으로써도 성취될 수 있다. Engelhardt와 Zimmermann(1982)은 지구과학자들이 새로운 규칙을 형성하는 데 사용하는 전략 중의 하나를 ‘발견법적 일반화’(heuristic generalization)라고 명명하였다. 발견법적 일반화는 경험적으로 얻은 자료들 속에서 규칙성(regularity)을 찾아 일반화하는 전략으로서, 다음과 같은 것들은 광물과 암석들을 관찰하여 발견된 공통된 특징들을 일반화함으로써 얻어진 진술들의 예이다(Engelhardt & Zimmermann, 1982, p.152).

화성암 속의 백운모는 오로지 화강암에서만 발견된다.
마그마에서 형성된 후 변성을 받지 않은 상태로 퇴적된 주석은 흑운모를 포함하지 않는 화강암 속이나 그 주변에서만 발견된다.

이렇게 일반화된 규칙들은 지질답사와 같은 지구과학 활동에서 얻게 되는 “혼란스러운 정도로 많은 관찰들”(bewildering multiplicity of observations, Engelhardt & Zimmermann, 1982, p. 153)을 요약해 주고, 이들과 관련된 법칙이나 이론이 미처 정립되어 있지 않은 경우에 관찰된 현상들을 설명하는 데 효과적으로 기능하게 된다. 이러한 일반화 전략은 형식적으로는 개개의 관찰 사실들로부터 모든 사례들에 대한 보편적인 진술을 얻고자 하는 열거적 귀납법(enumerative induction)과 유사한 특징을 지니고 있다. 그러나, 발견법적 일반화에 의해 형성된 규칙은 과학적 법칙이나 이론으로서의 지위를 가질 수 없으며, 귀추적

추론 과정에서 관찰된 현상을 설명하기 위해 임시적으로 동원된 것으로, 추후에 다른 과학 법칙이나 이론, 실험 결과 등과의 연계를 통하여 그 적절성이 또 다시 검토되어야만 한다(Engelhardt & Zimmermann, 1982). 그러므로, Psillos(2000)가 지적한 바와 같이, 귀추법은 그 진행 과정 속에 귀납적 형식의 사고 전략을 포함하는 포괄적인 성격의 추론이라고 할 수 있다. 발견법적 일반화 전략은 지구과학에서 특별히 중요한 역할을 하는데 그 까닭은 이미 논의한 바와 같은 지구과학의 본질적 속성에 크게 기인한다. 예컨대, 고생물에 관한 제한된 숫자의 정보만을 이용할 수밖에 없는 지구과학자들은 일차적으로 현재 관찰된 특성들이 관심의 대상이 되는 종(species)에 속하는 모든 객체들에게서 공통적으로 나타나는 일반적인 특성이라고 가정하고, 그렇게 가정된 내용을 규칙으로 삼아 과거 지구 환경을 귀추적으로 추론하게 된다(Engelhardt & Zimmermann, 1982).

3. 유추(analogy) 전략

귀추법에서 ‘유추’(analogy)란 비슷한 상황에서 성공적으로 기능하였던 규칙들을 이용하여 현재 주어진 현상에 대한 새로운 설명을 제시하는 전략을 말한다. 이 전략이 효과적으로 적용되기 위해서는 설명되어져야 할 현상들과 설명적 진술들 사이의 일관성(coherence)이 잘 확립되어 있어야 한다. 즉, $P_1 \rightarrow Q_1$ 이라는 규칙으로부터 $P_2 \rightarrow Q_2$ 라는 규칙을 유추해 내기 위해서는 설명 대상인 Q_1 과 Q_2 가 서로 유사해야(analogous) 하며, 새로운 설명 진술로서 P_2 또한 P_1 과 유사한 것이어야 한다(Thagard, 1988, 1992).

Snyder(1997)는 Kepler가 행성들이 비원형 궤도를 따라 움직인다는 설명적 가설을 제안하는 사고 과정에 유추적 추론 전략이 포함되어 있다고 주장하였다. 과학사에서 Kepler는 Copernicus 때까지만 해도 수학이나 기하학의 방법으로 천체들의 운동을 기술하는 운동학(kinematics)의 수준에 머물렀던 천문학의 지위를 천체가 움직이는 물리적인 원인을 규명하려는 동역학(dynamics)의 위치로 끌어 올림으로써 참된 의미의 천문학 혁명을 가져 왔다는 평가를 받고 있다(Koyré, 1973). Kepler는 수학적인 도구를 이용하여 현상을 묘사하는 것만으로는 과학적으로 옳은 주장을 할 수 없고 진정한 천문학자라면 현상의 원인을 설명할 수 있어야 한다고 믿고 있었다. 그러므로, 스승인 Tycho의 방대한 관측 자료들을 넘겨 받은 Kepler에게는 행성들의 궤도를 정확하게 기술하는 것뿐만 아니라 “행성들을 움직이게 하는 원인은 무엇인가?”라

는 물음이 답해야 할 또 하나의 과제로 주어져 있었던 셈이다. 이 물음에 대해 Kepler는 행성들을 운행하게 하는 모종의 힘이 태양으로부터 기원하고 그것은 자기력과 같은 것이라고 설명하였다. 즉, 행성들은 태양으로부터 방사되어 마치 소용돌이치듯이 움직이는 자기장 속을 운행하게 되는데, 행성이 태양의 자기력에 반발하는 방향으로 될 경우 태양으로부터 멀어지고 태양의 자기력에 이끌리는 방향으로 배열할 경우 태양에 가까워지게 됨으로써 결과적으로 비원형의 궤도를 그리게 된다는 것이다(Snyder, 1997). 물론, 이러한 생각은 후에 천체물리학이 더욱 발전하면서 잘못된 것으로 판명되었다. 그러나, Kepler의 사고 방법은 자기력이 서로 멀리 떨어져 있는 물체 사이에서 작용할 수 있다는 잘 알려진 규칙을 이용하여 행성 운동의 원인과 행성들의 궤도 모양을 설명하려 했다는 점에서 유추적 추론 전략의 좋은 예가 될 수 있다.

4. 존재에 관한(existential) 전략

지구과학의 역사를 살펴보면, 새로운 자연물이 귀추적 추론에 의해 예견되고 관찰과 실험 등의 경험적 방법으로 확인된 사례가 종종 있다. 예컨대, Hanson(1971)과 Thagard(1988)는 해왕성의 발견이 귀추적 추론에 힘입어 이루어졌다고 주장하였다. 해왕성의 발견은 관측된 천왕성의 위치가 Newton 역학에 의해 계산된 것과 일치하지 않는다는 문제로부터 촉발되었다. Newton 역학은 태양과 태양계 내의 다른 천체들의 중력적 영향을 고려하여 행성의 움직임을 이론적으로 기술해 줄 수 있다. 그런데, 이렇게 이론적으로 계산된 값과 비교했을 때 실제 천왕성의 궤도는 오차의 범위를 넘어서는 정도로 이탈되어 있었다. 이러한 이상 현상을 접한 John C. Adams와 Urbain Le Verrier는 각각 천왕성의 궤도 밖에 또 하나의 행성이 돌고 있으며 그 영향으로 인해 그런 오차가 생길 수 있다고 추론하였고, 실제 관측을 통하여 자신들의 예견한 행성 - 해왕성의 존재를 확인하였다(Leverington, 1995). 이와 같은 해왕성의 발견 과정에 포함된 귀추적 추론을 Hanson(1958)이 제안한 형식에 따라 표현하자면 다음과 같이 정리해 볼 수 있다.

1. 관측된 천왕성의 궤도가 이론적으로 계산된 궤도와 일치하지 않는 놀라운 현상이 발견되었다.
2. 만일 천왕성 주변에 또 하나의 행성이 돌고 있다면, 그러한 오차는 당연한 것으로 설명될 수 있다.
3. 따라서, 천왕성 주변에 또 하나의 행성이 돌고 있다는 가설을 제안할 좋은 이유가 있다.

이와 같이, 놀라운 현상을 접하게 되었을 때 이 전에는 관찰되지 않은 새로운 대상을 가정하여 주어린 현상을 설명하려는 귀추적 전략을 Thagard(1988)는 ‘존재에 관한 귀추법’(existential abduction)이라고 명명하였다. 예시한 것과 동일한 추론 전략은 수성의 근일점(perihelion)이 섭동(precession)하는 현상을 설명하기 위해 태양과 수성 사이에 또 하나의 행성이 있을 것이라는 가설을 제안하는 과정에 다시 적용되었는데, 결과적으로는 새로운 행성이 발견되지 않음으로써 두 번 성공한 전략이 되지는 못하였다(Leverington, 1995). 하지만, Hanson(1971)은 과학사에서 중성미자(neutrino)나 양전자(positron)와 같은 것들이 발견될 수 있었던 것은 “이상 현상을 잠재우기(putting anomalies to sleep) 위해 이론적 존재들(theoretical entities)을 상상한”(p. 67) 귀추적 사고 전략에 의한 것이라고 타당하게 지적하고 있다.

5. 개념적 결합(conceptual combination) 전략

Thagard(1988, 1992)는 귀추적 추론 과정에서 현상을 설명하기 위해 새로운 규칙을 형성하는 것은 이미 알려진 개념들을 결합함으로써 이루어질 수 있다고 주장한다. 그는 지구과학의 역사에서 Wegener가 대륙 이동설을 제안한 것이 바로 ‘개념적 결합’(conceptual combination) 전략에 의해 가능했다고 주장하고, 인공지능 프로그램에서 새로운 규칙을 형성하는 과정을 통하여 어떻게 대륙 이동설이 제안될 수 있었는지를 설명하였다. Thagard(1992, pp. 158-160)에 따르면, Wegener의 추론은 서로 멀리 떨어져 있는 아프리카 대륙과 남아메리카 대륙의 해안선이 매우 잘 일치한다는 현상을 인식한 것으로부터 시작되었다. 즉, 새로운 설명적 진술을 통해 해결되어야 할 놀라운 현상들은 다음과 같다.

1. 남아메리카와 아프리카 대륙이 서로 잘 일치한다 (fit together).
2. 남아메리카와 아프리카 대륙이 서로 떨어져 있다 (are apart).

그런데, 이러한 현상들은 다음과 같은 잘 알려진 규칙들에 의해 설명되어질 수 있다.

1. 만일 z 가 x 와 y 로 분리된다면, x 와 y 는 서로 잘 일치한다.
2. 만일 x 와 y 가 붙어 있다가 수평적으로 이동한다면(drift), x 와 y 는 서로 떨어져 있게 된다.

이제 위와 같은 규칙들에서 설명하는 개념들을 서로 결합하여 Wegener가 고려했던 문제에 적용한다면, ‘과거에 한 때 붙어 있던 대륙들이 분리되어 수평적으로 이동하였다면 서로 떨어져 있는 대륙들의 해안선이 서로 잘 일치한다’는 새로운 규칙이 생성되게 된다. 역사적으로 볼 때(Oreskes, 2003), Wegener의 대륙 이동설이 제안되기 이전에도 지구과학자들은 여러 가지 증거들을 통하여 오래 전에는 지구를 이루고 있는 대륙들이 하나로 연결되어 있었다는 생각을 가지고 있었다. 하지만, 그들 대륙들이 현재와 같이 멀리 떨어져 분포하게 된 까닭에 대해서는 처음 생성될 당시 고온이었던 지구가 서서히 냉각하면서 수축하게 되고 그 결과로 대륙의 일부가 밑으로 가라앉았기 때문이라는 설명이 널리 받아들여지고 있었다. 즉, 당시 대부분의 지구과학자들은 대륙들이 수직 이동(vertical movement)한다는 사고를 가지고 있었다고 할 수 있다. 그런데, 이와는 달리, Wegener는 대륙들이 수평 이동(horizontal movement)할 수 있다고 주장함으로써 그의 대륙 이동설은 지구과학에서 과학 혁명을 불러 일으켰다고 할 만큼 대범한 가설로 여겨졌던 것이다. 달리 말하자면, 대륙 이동설은 지구과학자들이 널리 인정하고 있었던 ‘하나의 대륙’이라는 개념과 Wegener 자신이 그린랜드를 탐험하면서 관찰하였던 미끄러져 움직이는 얼음덩어리의 모습에서 착안한(Giere, 1988) ‘수평 이동’이라는 개념이 결합하여 형성된 새로운 규칙에 힘입어 탄생한 것이라고도 할 수 있다. Thagard(1988)에 따르면, 이렇게 기존의 개념들을 조합하여 새로운 규칙을 창출하는 것이 과학에서 종종 발견된다고 한다. 예컨대, Newton의 중력 이론은 일상 생활에서 그와 관련된 현상을 쉽게 경험할 수 있는 힘이라는 개념과 시각적으로는 관찰할 수 없는 인력(invisible attraction)이라는 개념이 이론적으로 결합한 결과이다.

6. 사전 평가(prior assessment)를 통한 제거(elimination) 전략

귀추법에 대한 Hanson(1961)의 후기 논의에서 암시되는 바와 같이, 과학자들은 어떤 현상을 설명하기 위하여 하나의 규칙을 즉각적으로 제안하기 보다는 여러 가지 유형의 규칙들을 탐색하여 가장 설득력 있는 설명을 제공해 줄 수 있는 것을 선택하는 과정을 밟게 된다. 따라서, 이러한 과정 속에는 대안적인 규칙들을 서로 비교, 평가하여 잘못된 유형의 것들을 배제하는 ‘제거’(elimination) 전략이 개입할 수밖에 없다. 이 점에서 Curd(1980)는 Peirce와 Hanson이 제

안한 귀추법이 가설을 이끌어 내는 방법임과 동시에 과학자들이 장차 진지하게 탐구해 볼만한 가설을 선정하기 위해 사용하는 ‘사전 평가의 논리’(logic of prior assessment)의 성격을 지니고 있다고 지적하였다. 또, Snyder(1997)는 Kepler가 행성들의 운동에 관한 물리적인 원인을 추구하는 과정에 제거적 추론 전략이 어떻게 적용되었는가를 다음과 같이 기술하고 있는데, 이는 귀추적 추론에서 사전 평가를 통하여 대안적인 규칙들과 그에 따른 설명들을 제거해 나가는 과정을 보여주는 하나의 예가 될 수 있다.

행성의 속도가 근일점에서 최대가 된다는 것은 톨레미(Ptolemy) 시절 이전부터 관측적으로 알려져 있었다. ... 케플러는 다음과 같은 질문을 던진다: “태양으로부터 멀어져 갈수록 행성의 운동이 ‘약해지는’(weakening) 원인이 무엇일까?” 제거적 추론을 수행하면서, 케플러는 거기에는 세 가지 가능한 답변들이 있다고 주장한다: (a) 행성의 운동이 약해지는 것이 태양으로부터의 거리가 점점 멀어지는 것의 원인이다; (b) 태양으로부터의 거리가 점점 멀어지는 것이 행성의 운동이 약해지는 것의 원인이다; (c) 이들 두 가지 현상에는 어떤 공통된 원인이 있다. 케플러는 다른 두 가지 답변이 “그 자체로서 충분하기”(sufficient in themselves) 때문에 (c)는 불필요하다고 하여 (c)를 배제한다. 또한, 거리가 운동에 앞서는(prior) 것이 자연스럽고(naturally) 논리적(logically)이라는 이유에서 (a)를 배제한다. 즉, 행성의 운동은 결코 태양으로부터 어떤 거리를 갖는 것과 독립적으로 일어날 수 없으며 그렇게 되리라고는 상상조차 할 수 없지만, 행성이 운동하지 않으면서도 태양으로부터 어떤 거리를 가질 수 있고 그렇게 되는 것은 얼마든지 생각해 볼 수 있다는 것이다. 이렇게 하여 케플러에게는 (b)의 설명, 즉 태양으로부터의 거리가 행성의 운동이 약해지는 원인이라는 결론만이 남게 되었다 (pp. 591-592).

이 후에 Kepler는 또 다른 제거적 사고 과정을 통해 행성의 운동을 약하게 하는 원인이 태양에 기원할 것이라고 추론하게 되고, 앞 절에서 말한 바와 같이, 자기력과 유사한 개념을 도입함으로써 태양에서 기원하는 동인(motive force)을 통하여 행성의 운동을 설명한다(Snyder, 1997).

과학사의 실례들을 살펴보면, 과학자들은 여러 가지 상황에서 매우 다양한 증거들에 근거하여 과학적인 주장들을 평가하였다. 예컨대, 위에 인용된 내용에서 Kepler는 논리적으로 타당하지 않다는 이유로 경쟁하는 답변들을 제거하였지만, 그가 태양계의 실제 모습을 묘사하는 것으로 Copernicus의 모형을 선택할 때에는 그 모형이 단순성(simplicity)과 통일성(unity)이라는 기준을 만족한다는 것이 중요한 이유가 되었다(Westman, 1973). 이 밖에도 과학자들이 어떤 과학적인 주장을 평가하는 데에는 풍부한 설명력(explanatory fertility), 심미적 우수성(aesthetic elegance), 대칭성

(symmetry), 다른 이론들과의 정합성(congruence), 적용 범위(scope) 등 다양한 준거들이 동원된다. 이러한 준거들은 과학자들이 어떤 이론을 최종적으로 승인하는 정당화의 맥락에서 뿐만 아니라 최초로 가설을 제안하는 발견의 맥락에서도 중요한 기준들이 되었다(Kordig, 1978). 다시 말하여, 그러한 준거들은 귀추적 추론 과정에서 여러 대안적인 규칙들을 평가하고 특정한 규칙들을 제거하여 가장 유력한 설명적 가설을 제공하는 규칙을 선택하기 위한 좋은 이유를 제공해 준다고 할 수 있다. 하지만, 어떤 준거가 어느 경우에 필연적으로 등장하게 되는지에 관해서는 일반적인 규범 따위가 존재하지 않는 것처럼 보인다. 즉, 모든 준거들이 어떤 상황에서든지 동일하게 적용되지 않고, 오히려 그들이 얼마나 효과적으로 기능하느냐 하는 것은 맥락에 의존적일(context dependent) 수밖에 없다(Magnani, 2001).

V. 귀추적 탐구 모형

서론에서 언급한 바와 같이, 지구과학 교육 현장에서 학생들을 위한 탐구 활동은 지구과학의 본질적 속성에 잘 부합하는 탐구 과정, 즉 귀추적 추론 과정을 모델로 구성하는 것이 바람직하다. 과학의 탐구 방법의 하나로서 귀추법을 바탕으로 한 교수-학습 모형에는 Lawson(1995)이 제안한 ‘경험-귀추적 순환 학습 모형’(empirical-abductive learning cycle)과 Kim(2003)이 제안한 ‘귀추적 탐구 모형’(abductive inquiry model)이 있다. 경험-귀추적 모형은 다른 순환 학습 모형과 같이 탐색(exploration), 개념 도입(term introduction), 개념 적용(concept application)의 세 단계로 구성되어 있다. 첫째 단계인 탐색 단계에서는 학생들이 조사 대상에 대한 서술적인 자료를 수집하고 수집된 자료를 바탕으로 왜 그러한 현상이 나타나는지를 귀추적 사고 과정을 통해 추론하게 된다. 둘째 단계인 개념 도입 단계에서는 교사가 학생들이 이전 단계에서 경험한 자료와 학생들 스스로 구성한 설명을 과학 지식과 연결할 수 있도록 과학적인 개념을 도입한다. 마지막으로 개념 적용 단계에서는 학생들이 지금까지 학습한 과학적인 개념을 다른 사례나 상황에 적용하는 새로운 활동이 진행된다. 이와 같은 경험-귀추적 순환 학습 모형은 귀추적 탐구 과정을 처음 단계에 적용하고 이를 바탕으로 이 후의 과학 교수-학습을 진행해 나가는 포괄적인 수업 모형으로서 의의를 지니고 있다고 하겠다.

Lawson(1995)의 모형과 비교하여, Kim(2003)의 모

형은 귀추적 사고 과정에 초점을 두어 지구과학 탐구 활동에 적합한 형태로 구성된 탐구 모형이다. 이 모형은 탐색(exploration), 조사(examination), 선택(selection), 설명(explanation)이라는 네 단계로 구성되는데, Kim(2003)의 모형을 본 연구에서 고찰한 귀추법의 특성을 고려하여 수정, 제시하자면 Fig. 1과 같다.

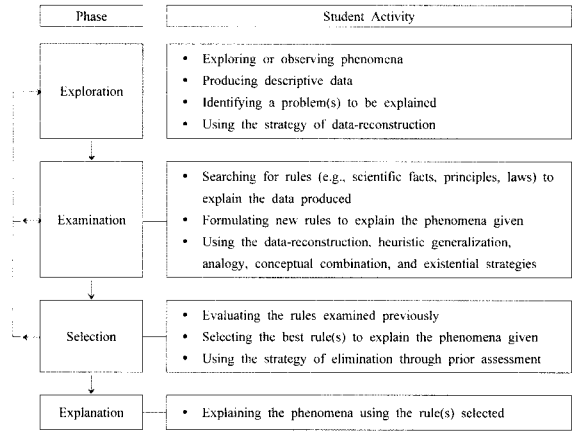


Fig. 1 Abductive Inquiry Model (adapted from Kim, 2003)

Fig. 1의 귀추적 탐구 모형에서 첫 번째 탐색 단계에서는 학생 중심으로 지구과학적 현상이나 대상에 대한 서술적 탐구 활동이 이루어진다. 이 때, 학생들은 주어진 현상이나 대상을 직·간접적으로 관찰하여 그 특징을 기술한 자료를 산출하게 된다. 이와 동시에 학생들은 무엇이 설명되어야 하는가에 대하여 생각해 보고, 설명되어야 할 문제에 적절한 형태로 자료가 제공하는 정보를 재배열할 수 있다. 즉, 귀추적 추론에 사용되는 여러 가지 전략들 중에 자료에 대한 재구성 전략이 이 단계에 적용될 수 있다. 탐색 단계 이후의 조사-선택-설명 단계는 현상을 설명하기 위하여 규칙을 추리하고 가설을 제안하기 위한 핵심적인 과정으로서, 이 모형에서 귀추법이 가장 직접적으로 반영된 것들이라 할 수 있다. 조사 단계에서는 학생들이 앞에서 서술한 자료를 설명하는 데 활용될 수 있는 규칙들을 조사하여 주어진 자료에 대한 임시적인 설명을 시도한다. 말하자면, 지구과학적 현상을 설명하는 데 활용될 수 있는 다양한 규칙들의 목록을 추리해 내는 것이 이 단계의 주된 목표이며, 학생들은 앞에서 언급한 여러 가지 귀추적 사고 전략들을 복합적으로 동원할 수 있다. 선택 단계는 학생들이 조사한 여러 가지 가능한 규칙들 중에서 가장 적절한 것을 선택하도록 하기 위한 것이다. 이 단계에서는 사전 평가에 의한 제거 전략이 중요한 역할을 하고, 이미 언

급한 다른 전략들도 여전히 적용될 수 있다. 또한, 이미 탐색한 현상이나 대상으로부터 새롭게 설명되어야 할 정보나 문제가 발견될 경우 학생들은 그것에 대한 서술적 탐구를 새로 시작할 수 있고 다른 규칙들을 추가로 조사하는 단계를 다시 밟을 수도 있다. 이러한 순환적인 성격은 <Fig. 1>에 화살표를 이용하여 가시적으로 표현되었다. 마지막으로 설명 단계에서는 학생들이 자신들이 선택한 가장 적절한 규칙을 이용하여 자료에 대한 최종적인 설명적 진술을 구성하게 된다. 이 때 학생들이 제안하는 설명은 지구과학적 과정들을 연대기적으로 재구성한 것이거나 지구과학적 현상의 원인들을 제시하는 것이 될 수 있고, 문제의 맥락에 따라 이 두 가지 설명이 함께 진술될 수도 있다.

VI. 앞으로의 과제

이상과 같이, 본 연구에서는 지구과학의 본질적 속성을 살펴보고, 지구과학 탐구의 한 방법으로서 귀추법의 형식과 의미에 대해 논의한 후, 규칙 추리와 가설 제안 과정에서 사용되는 사고 전략들과 지구과학 교육 현장에 적용할 수 있는 귀추적 탐구 모형에 대해 차례로 고찰하였다. 이러한 내용들은 지구과학의 본성을 고려한 교수-학습 방법을 모색하는 데 중요한 시사점을 던져주는 것이라고 생각된다. 따라서, 앞으로는 귀추적 탐구 방법을 모델로 한 지구과학 수업을 개발하고 교육 현장에서 실천하는 일이 뒤따라야 할 것이다. 특히, 귀추적 탐구를 수행하는 데 있어서는 탐구의 전 과정에서 학생들을 적절히 안내하고 학생들의 사고를 촉진시키는 교사의 역할이 중요하다고 생각된다. 즉, 교사는 “자료 속의 어떤 증거들을 활용하여 주어진 현상을 설명할 수 있을까?”, “주어진 현상과 같거나 비슷한 현상들을 경험해 보았다면 어떤 것들이 있는가?”, “이 문제를 해결할 수 있는 관찰되지 않는 지구과학적 현상이나 과정이 있지는 않을까?”, “이 현상에 대한 대안적인 설명들에는 어떤 것들이 있을 수 있을까? 왜 그런 것들은 타당하거나 타당하지 않은가?”와 같은 발견법적 질문들을 제시하여 학생들의 사고를 자극할 수 있을 것이다. 또, 학생들이 이미 알고 있는 규칙을 추리해 내거나 새로운 규칙을 창안하는 데 도움이 될 수 있는 정보를 제공하거나 그 과정에 조력자로서 참여함으로써 학생들의 탐구 수행을 안내할 수 있을 것이다. 지구과학 교육 연구의 측면에서는 학생들이 어떤 구체적인 사고 전략을 활용하여 귀추적 탐구를 수행하는지, 귀추적 탐

구의 효과는 무엇인지, 어떤 수업 방법이나 전략들을 보완적으로 사용했을 때 귀추적 탐구의 효과를 증진시킬 수 있는지 등에 관해 밝히는 작업이 이루어져야 할 것이다. 특별히, 귀추적 탐구에 관한 이러한 과제들을 수행하기 위해서는 현장의 지구과학 교사들과 지구과학 교육 연구자들의 동반자적이고 협력적인 관계가 필수적이라고 하겠다.

국문 적요

본 연구는 과학적 탐구 방법의 하나로서 귀추법을 토대로 한 지구과학 탐구 활동을 고안하고 수행하는 기초를 마련하기 위한 이론 연구이다. 관련 분야의 문헌들을 탐색하여 지구과학의 본성을 지구과학 탐구의 목적과 탐구 대상의 특징이라는 측면에서 살펴 보고, 귀추법의 형식과 의미, 규칙 추리와 가설 제안 과정에서 사용되는 사고 전략들, 귀추법에 바탕을 둔 수업 모형을 차례로 고찰하였다. 귀추법은 어떤 현상을 설명하기 위하여 특정한 사실이나 원리, 법칙 등과 같은 규칙을 추리해 내고 그 속에 함의된 설명적 진술이나 설명적 가설을 제안하는 과정으로서 지구 환경의 형성 원인과 과정을 연구하는 지구과학 탐구에 잘 부합하는 탐구 방법임을 논하였다. 귀추법은 또한, 확장적, 선택적, 평가적, 창조적인 성격을 지니고 있으며, 규칙 추리와 가설 제안 과정에는 자료에 대한 재구성, 발견법적 일반화, 유추, 개념적 결합, 사전 평가에 의한 제거, 존재에 관한 전략 등이 사용되고 있음을 알 수 있었다. 이러한 귀추법을 토대로 한 교수-학습 모형으로서 귀추적 탐구 모형은 지구과학 교육 현장에 적용하기에 적절한 것으로 판단되었고, 이에 따라 귀추적 방법을 모델로 한 지구과학 수업과 이와 관련된 연구가 이루어져야 한다는 것을 제안하였다.

참고 문헌

- 권용주, 심해숙, 정진수, 박국태 (2003). 수증기 응결에 관한 초등학생들의 가설 생성에서 귀추의 역할과 과정. 한국지구과학회지, 24(4), 250-257.
- 권용주, 정진수, 강민정, 김영신 (2003). 과학적 가설 지식의 생성 과정에 대한 바탕 이론. 한국과학교육학회지, 23(5), 458-469.
- 권용주, 정진수, 박운복, 강민정 (2003). 선언적 과학 지식의 생성 과정에 대한 과학철학적 연구: 귀납적, 귀추적, 연역적 과정을 중심으로. 한국과학교육학회지, 23(3), 215-228.
- 박종원 (2000). 학생의 과학적 설명 가설의 생성 과정 분석: 과학적 가설의 정의와 특성을 중심으로. 한국

과학교육학회지, 20(4), 667-679.

소흥렬 (1991). 귀추법의 논리. 과학과 철학, 2, 139-155.

이훈 (1989). 삼단 논법과 변증법. 철학논집, 5, 3-30.

정상모 (1993). 발견의 3가지 의미. 인지과학, 4(1), 25-49.

최승언 (1998). 지구과학교육. 서울대학교 교육연구소 (편), 교육학 대백과사전(pp. 2412-2422). 서울: 하우동설.

American Association for the Advancement of Science (1990). Science for all Americans. New York, NY: Oxford University of Press.

Bragrie, B. S. (1990). The justification of Kepler's ellipse. Studies in History and Philosophy of Science, 21, 633-664.

Bybee, R. W. (2000). Teaching science as inquiry. In J. Minstrell & E. H. van Zee (Eds.), Inquiring into inquiry learning and teaching in science (pp. 20-46). Washington, DC: American Association for the Advancement of Science.

Chalmers, A. F. (1982). What is this thing called science?: An assessment of the nature of status of science and its method. (신일철, 신중섭 (역) (1985). 현대의 과학철학. 서울:서광사) University of Queensland Press.

Chiappetta, E. L., & Koballa, T. R. Jr. (2002). Science instruction in the middle and secondary schools. Upper Saddle River, NJ: Merrill Prentice Hall.

Clement, J., & Oviedo, M. C. N. (2003). Abduction and analogy in scientific model construction. Paper presented at the National Association for Research in Science Teaching Annual International Conference, Philadelphia, PA, March 23-26, 2003.

Curd, M. V. (1980). The logic of discovery: An analysis of three approach. In B. A. Brody & R. E. Grandy (1989) (Eds.), Readings in the philosophy of science Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.

DeBoer, G. E. (1991). A history of ideas in science education: Implications for practice. New York, NY: Teachers College, Columbia University.

Engelhardt, W. von, & Zimmermann, J. (1982). Theory of earth science (translated by L. Fischer). Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Giere, R. N. (1988). Explaining science: A cognitive approach. Chicago, IL: University of Chicago Press.

Goudge, T. A. (1950). The thought of C. S. Peirce. New York, NY: Dover Publications.

Guthrie, R. D. (1984). Mosaics, allelochemics, and nutrients: An ecological theory of late Pleistocene megafaunal extinctions. In P. S. Martin & R. G. Klein (Eds.), Quaternary extinctions: A prehistoric

revolution (pp. 259-298). Tucson, AZ: University of Arizona Press.

Gutting, G. (1980). The logic of invention. In T. Nickles (Ed.), Scientific discovery, logic, and rationality (pp. 221-234). Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing Company

Hanson, N. R. (1958). Patterns of discovery. London, UK: Cambridge University Press.

Hanson, N. R. (1961). Is there a logic of scientific discovery? In B. A. Brody & R. E. Grandy (1989) (Eds.), Readings in the philosophy of science Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.

Hanson, N. R. (1971). Observation and explanation: A guide to philosophy of science. London, UK: George Allen & Unwin(2nd Ed.), (pp. 417-430). .

Kim, C.-J. (2002). Inference frequently used in earth science. The Journal of the Korean Earth Science Society, 23(2), 188-193.

Kim, C.-J. (2003). Preparing teachers for systems science methodology. In V. J. Mayer (Ed.), Implementing global science literacy (pp. 255-266). Columbus, OH: The Ohio State University.

Kordig, C. R. (1978). Discovery and justification. Philosophy of Science, 45, 110-117.

Koyré, A. (1973). The astronomical revolution (translated by R. E. W. Maddison). Ithaca, NY: Cornell University Press.

Laudan, R. (1987). From mineralogy to geology: The foundations of a science (pp. 1650-1830). Chicago, IL: University(2nd ed., pp. 417-430). of Chicago Press.

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

Leverington, D. (1995). A history of astronomy: From 1890 to the present. Oxford, UK: Springer.

Llewellyn, D. (2002). Inquire within: Implementing inquiry-based science standards. Thousand Oaks, CA: Corwin Press.

Magnani, L. (2001). Abduction, reason, and science: Process of discovery and explanation. New York, NY: Kluwer Academic/Plenum Publishers.

Martin, P. S. (1984). Prehistoric overkill: The global model. In P. S. Martin & R. G. Klein (Eds.), Quaternary extinctions: A prehistoric revolution (pp. 354-403). Tucson, AZ: University of Arizona Press.

National Research Council (1996). National Science Education Standards. Washington, DC: National Academy Press.

National Research Council (2000). Inquiry and the National Science Education Standards: A guide for

teaching and learning. Washington, DC: National Academy Press.

Nickles, T. S. (Ed.) (1980). *Scientific discovery, logic, and rationality*. Dordrecht, The Netherlands: D. Reidel Publishing Company.

Oh, P. S. (2004). The nature of scientific methods and its implication for inquiry activities in science classrooms. *East-West Education*, 21, 89-101. Ewha Womans University.

Oreskes, N. (Ed.) (2003). *Plate tectonics: An insider's history of the modern theory of the earth*. Boulder, CO: Westview.

Popper, K. R. (1959). *The logic of scientific discovery* (박우석 (역) (1994). *과학적 발견의 논리*. 서울: 고려원). Hutchinson.

Psillos, S. (2000). Abduction: Between conceptual richness and computational complexity. In P. A. Flach, & A. C. Kakas (Eds.), *Abduction and induction* (pp. 59-74). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

Selles-Martinez, J. (2004). International Earth Science Olympiad: What to test and how to do so. *Seoul Conference for International Earth Science Olympiad(IESO) Conference Proceedings*, 136-142.

Snyder, L. J. (1997). Discoverer's induction. *Philosophy of Science*, 64, 580-604.

Thagard, P. (1988). *Computational philosophy of science*. Cambridge, MA: The MIT Press.

Thagard, P. (1992). *Conceptual revolutions*. Princeton, NJ: Princeton University Press.

Westman, R. S. (1973). Kepler's theory of hypothesis. *Vistas in Astronomy*, 16, 713-720.