

학생의 과학적 설명가설의 생성과정 분석 - 과학적 가설의 정의와 특성을 중심으로 -

박종원

(전남대 사범대학 물리교육과)

Analysis of Students' Processes of Generating Scientific Explanatory Hypothesis - Focused on the Definition and the Characteristics of Scientific Hypothesis -

Jongwon Park

(Chonnam National University)

ABSTRACT

One of the major activities in scientific inquiry, as well as in the process of conceptual change, is the generation of scientific hypothesis. In this study, the definition and the characteristics of scientific hypothesis are analyzed. Especially, differences between explanatory hypothesis and scientific explanation, predictive hypothesis and scientific prediction, and scientific hypothesis and the inductive generalization are analyzed. And the process of making scientific hypothesis is suggested as 4 stages, and the role and the characteristic of the abductive thinking, which can be viewed as one of the scientific inferences needed to generate hypothesis, are discussed. In analysis, concrete examples from integrated science textbook of high school are used for application to the classroom teaching.

Key words : scientific hypothesis, explanatory hypothesis, scientific inquiry.

I. 서 론

웬햄(Whenham, 1993)은 과학탐구에서 가장 중요한 활동 중의 하나가 가설을 설정하는 활동이라고 강조한 바 있다. 클라르와 둔바(Klahr & Dunbar, 1988)도 과학적 발견은 2개의 문제공간 - 가설 공간(가설을 설정하는 활동)과 실험공간(가설을 검증하는

활동) - 에서 이루어진다고 하여, 과학활동에서 가설 설정이 중요한 과학적 활동임을 언급하였다. 드라이버(Driver, 1988)도 학생들이 자신의 선행개념과 다른 현상에 직면하였을 때 그 현상을 설명하기 위해 상상(imagination)과 고안(invention)이 중요한데, 이러한 사고활동이 바로 가설의 설정과정이라고 하였다.

특히, 과학적 가설의 생성은 개념변화 과정에서도

• 2000년 10월 5일 받음.

• 이 논문은 1999년도 학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-1999-C00600)

중요한 역할을 한다는 지적이 있어왔다. 인지갈등의 해소에 대한 연구로부터, 갈등의 해소를 위해서는 불일치 자료를 설명해 줄 수 있는 새로운 가설의 도입이 필요하다는 것이다. 예를 들면, Park 등(1997)은 학생들에게 자신의 선개념과 불일치하는 실험결과를 관찰하게 하면서 면담을 통해 학생의 반응을 분석하였다. 분석 결과, 학생들의 반응은 불일치를 수용하고 개념의 변화를 보이는 경우와, 불일치를 거부하거나 또는 라카토스(Lakatos)식으로 보호대(protective belt)만을 수정하는 경우로 나누어 질 수 있었다. 그리고 연구자들은 개념변화를 보이는 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 새로운 가설을 도입한 경우가 많다는 것을 관찰하였다. 이와 같이 개념변화를 위해서는 새로운 가설의 제안이 필요하다는 측면은, 이론의 반증과정에 대한 과학 철학적 논의에서도 찾아볼 수 있다. 예를 들어, 라카토스(Lakatos, 1995)는 다음과 같이 언급하였다.

소박한 반증주의자와는 반대로, 실험, 실험보고, 관찰 기술, 또는 잘 확증된 저차원의 반증가설 등 어느 것도 그것만으로는 결코 반증에 이르지 못한다. 보다 나은 이론이 나타나기 전에는 결코 어떤 반증도 존재하지 않는다. (p.35)

마찬가지로 쿤(Kuhn, 1970)도 다음과 같이 언급하였다.

즉, 일단 과학이론이 패러다임의 지위를 성취하면, 그 이론에 대치될 다른 후보가 나타날 때에만 무용하다고 선언된다. 아직까지 과학에 관한 연구에 의해 발견된 어떤 과정도 이론을 자연현상과 직접 비교하여 허위를 입증하는 방법론의 공식에 따른 경우는 없었다. (p.77)

새로운 가설의 생성과정은 과학철학에서 말하는 발견의 상황(context of discovery)과 연관성이 많다. 예를 들면, 퍼스(Pierce, 1931)와 헨슨(Hanson, 1958)이 제안한 귀추(abduction)를 통한 추론은 발견의 과정에 대한 좋은 설명을 제안하고 있다(Curd, 1989). 또 다든(Darden, 1992)은 계산적 과학철학

(computational philosophy of science)의 관점에 기초해서, 발견의 과정을 문제해결과정과 인지과학에서의 인공지능 이론과 접목하여 새로운 설명을 시도하기도 하였다. 라글리 등(Lagley et al., 1987)도 발견의 과정을 문제 해결의 특수한 형태로 보고 연구한 바 있다.

이 외에도 심리학 분야에서의 비유 추론을 통한 발견의 과정(Hesse, 1966; Holyoak & Thagard, 1989)에 대한 연구와 개념적 조합을 통한 발견의 과정에 대한 연구(Thagard, 1988)들도 새로운 가설의 생성과정에 대한 연구와 밀접한 연관성을 가지고 있다.

그러나, 새로운 가설의 생성과정 또는 새로운 이론의 창안과정에 대한 논의가 모든 사람의 관심을 이끌어 왔던 것은 아니다. 예를 들어, 포퍼(Popper, 1968)는 다음과 같이 지적하였다.

처음 단계인 이론을 고안하고 인식하는 행위는 나에게서는 논리적 분석을 요구하지 않을 뿐 아니라, 가능하지도 않다고 본다. 새로운 아이디어가 어떻게 나오는지에 대한 질문은 경험 심리학의 흥미는 될 수 있을 것이다. 그러나 과학적 지식의 논리적 분석과는 무관한다. (pp. 31-32)

더구나, 과학적 가설 자체에 대한 정의와 특성에 대한 논의가 명확하지 못하다는 지적도 있다(Wartofsky, 1968). 학교 과학 학습이나 학생들의 탐구활동과 관련된 과학적 가설에 대한 논의도 매우 다양하다. 예를 들어, Warwick Process Science(1989)에서는 관찰이나 분류, 예측이나 변인통제 등과 같은 탐구기능에 비해 상대적으로 과학적 가설이 사람들에게 따라 여러 가지로 해석되고 이해되고 있음을 지적하였다. 과학적 가설에 대한 구분도 연구자들에 따라 다르다. 예를 들어, 웬햄(Whenham, 1993)은 과학적 가설을 설명적 가설, 예측적 가설, 기술적 가설로 구분하여 논의하였지만, 예측적 가설이 과학적 예측과 어떠한 연관성을 가지고 있는지, 설명적 가설이 과학적 설명과 어떠한 관련성을 가진 것인지, 또는 기술적 가설이 귀납적 일반화에 의한 규칙성의

기술과는 어떠한 관계인지 등을 명확하게 논의하지 못하였다. 또한 저먼 등 (German, et al., 1996)은 실험적 가설과 이론적 가설로 나누었고, 다리안 (Darian, 1995)은 이론적, 발견적, 그리고 통계적 가설로 나누었다. 그러나 다리안(Darian)의 경우는 발견적 가설을 일반적인 가정(assumption)들과 명확하게 구분하지 못하였다.

국내에서는 권용주 등 (2000)이 예비 과학교사들이 제안한 실제 가설들의 특성을 분석하고, 그들이 어떠한 과정으로 가설을 제안하게 되었는지를 분석하였다. 그들은 예비 교사들의 가설을 내용의 수준에 따라, 조작적(manipulative) 수준의 설명가설과 이론적(theoretical) 수준의 설명가설로 나누었다. 또한 예비교사들의 가설 창안 과정이 인과적 설명구조를 가지지 못하는 경우와 기본적으로 귀추적 사고에 의해 제안된 경우로 나누어질 수 있다고 하였다. 그러나 이 연구에서도 과학적 가설 자체의 특성에 대한 논의가 충분한 것은 아니었다.

이와 같이, 과학적 가설 자체에 대한 논의가 다양하고 명확하지 못한 상황이라면, 새로운 과학적 가설의 생성과정에 대한 논의도 분명해지기 어려울 것이다.

따라서, 본 연구에서는 과학적 가설의 생성과정에 대한 연구의 이론적 기초로서, 먼저 과학적 가설 자체에 대한 논의부터 하고자 한다. 이를 위해 과학적 가설의 정의와 유형 등 과학적 가설의 특성에 대한 논의를 하고자 한다. 구체적인 연구문제는 다음과 같다.

- 첫째, 과학적 가설은 어떻게 정의할 수 있으며, 어떤 유형이 있는가?
- 둘째, 과학적 설명가설과 과학적 설명은 어떻게 구별할 수 있는가?
- 셋째, 과학적 예측가설과 과학적 예측은 어떻게 구별할 수 있는가?
- 넷째, 과학적 가설과 귀납적 일반화는 어떻게 구별할 수 있는가?
- 다섯째, 과학적 가설의 조건은 무엇인가?

여섯째, 과학적 가설의 제안과정과 과학적 가설의 제안에 관련된 과학적 사고는 무엇인가?

본 연구에서는 위의 연구문제들을 논의하면서 가능하면 구체적인 예들을 제시하고, 특히 현재 고등학교 공통과학 교과서에서 볼 수 있는 예들을 직접 인용하거나 변형하여 사용함으로써, 학교에서의 과학적 가설 설정 활동의 지도에도 직접 활용할 수 있도록 하였다.

II. 본 론

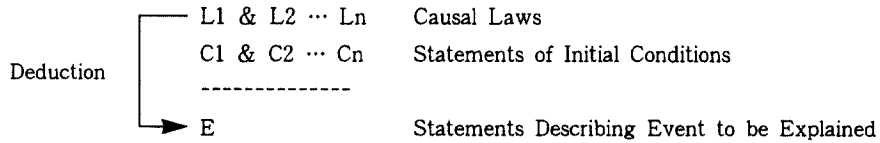
1. 과학적 설명 가설로서의 과학적 가설

과학 활동뿐 아니라 과학 학습에서 널리 사용되는 과학적 가설에 대한 정의 중의 하나는 '과학적 가설은 어떤 현상이 왜 일어났는지를 인과적으로 설명하기 위해 제안된 임시적인 해'라는 것이다. 이는 분명하게 말하면 과학적 설명가설(explanatory hypothesis)이라고 할 수 있다(Wenham, 1993). 퀴인과 조지(Quinn and George, 1975)도 비슷하게 정의하였는데, 그는 가설이란 주어진 문제 상황에서 변인들간의 실제적 관련성에 대한 검증가능한 설명이라고 정의하였다. 또, 밀러(Millar, 1989, p. 56)는 가설을 설정하는 것은 관찰된 규칙성을 설명하기 위해 자료를 뛰어넘는 상상적 도약 활동이라고 하였다. 좀 더 구체적으로 로슨(Lawson, 1995)은 다음과 같은 상황에서 어느 동물학자의 추측이 바로 과학적 가설이라고 예를 들었다.

동물 중에 가젤이라는 동물이 있다. 이 동물은 치타와 같은 약탈자가 나타나면 도망가기보다는 무리들 속에서 펄쩍 펄쩍 높이 뛰면서 흰 엉덩이를 약탈자에게 보이는 이상한 행동을 한다. 이러한 행동은 동물학자들에게 오히려 치타에게 추격당하기 쉬운 행동이라고 생각되어 이상한 행동으로 알려져 있었다. 이에 대해 어떤 동물학자는 '가젤의 그러한 행동은 주변의 어린 가젤들에게

2) Lawson의 원래 내용을 요약하였음.

Table 1. D-N Model of Scientific Explanation (Martin, 1972, p. 51)



위험을 먼저 알려 도망갈 수 있도록 하기 위한 행동이다'라는 추측을 하였다. (pp.6-8)²⁾

임시적 설명으로서의 과학적 가설에 대한 위와 같은 정의는 다음과 같이 과학철학에서도 볼 수 있다 (Hempel, 1966).

과학적 가설은 관찰된 사실로부터 나오는 것이 아니라, 그것을 설명하기 위해 고안되는 것이다. 그것은 연구하고 있는 현상들 간의 연관성들에 대해 추측한 것으로 구성되어 있다. (p.15)

2. 과학적 설명가설과 과학적 설명

과학적 설명 가설에 대한 위와 같은 정의에서 중요한 점은 어떤 현상에 대한 '설명'이라는 것이다. 그렇다면 과학적 설명과 과학적 설명가설의 차이는 무엇인가? 이에 대한 논의를 위해서는 먼저 과학적 설명이 무엇인가를 정리할 필요가 있다.

과학적 설명에 대한 여러 가지 관점 중의 하나는 험펠(Hempel, 1965)의 D-N 모델(Deductive-Normative Model)이다 (Table 1). 이 모델에 의하면, 과학적 설명이란 주어진 일반법칙과 설명해야 할 현상에 대한 초기조건으로부터 어떤 현상이 왜 일어났는지를 연역 논리적으로 이끌어 내는 과정으로 정의할 수 있다(박종원, 1998; Park and Han, unpublished). 이는 과학적 설명을 연역적 구조로 보는 관점이다. 이 관점은 비록 고전적인 관점으로 비판받기도 하지만(Feyerabend 1975), 아직도 많은 과학자뿐 아니라 과학교육자들은 과학적 설명에 대한

D-N 모델을 널리 가지고 있다(Edington, 1997). 레이프와 라르킨 (Reif & Larkin, 1991)도 과학적 설명에 대해 D-N 모델과 유사한 관점을 보이고 있으며, 포퍼 (Popper, 1969)도 다음과 같이 언급하였다.

어떤 사건에 인과적 설명을 가한다는 것은, 하나 또는 그 이상의 보편 법칙들과 특정 단칭 언명들인 초기 조건들을 연역의 전제들로 사용하여 그것을 기술하는 하나의 언명을 연역해 내는 것을 의미한다. (p. 59)

그러면 과학적 설명과 과학적 설명가설의 차이는 무엇인가? 가장 중요한 차이는, 과학적 설명의 경우에는 일반법칙이 이미 주어져 있고 그로부터 연역적인 설명을 한다는 것이고, 과학적 설명가설의 경우에는 일반 법칙을 제안함으로써 그로부터 연역적인 설명을 할 수 있도록 한다는 것이다. 즉, 어떠한 현상이 관찰되고, 왜 그러한 현상이 일어났는지를 설명하기 위해 적절한 일반법칙을 탐색(searching)하면서 적절한 일반법칙을 찾지 못하게 되면 새로운 일반법칙을 제안하게 되는데 이때가 바로 가설을 제안하게 되는 과정이다. 일단 과학적 가설을 제안하게 되면, 제안된 가설과 현상에 대한 초기조건을 이용하여 연역적으로 현상을 설명하게 된다. 즉, 과학적 가설의 제안을 통해 과학적 설명을 하게 되는 것이다. 그러나 다음과 같은 예를 보자.

관성의 법칙을 설명해 주고 선생님은 학생들에게 식탁보를 재빠르게 당기자 식기들이 식탁 위에 그대로 서 있는 시범을 보여 주었다. 그리고 왜 식기들이 넘어지지 않고 그대로 서있는지를 물었다. 이에 영희는 '관성

의 법칙에 의해서, 식탁보를 재빠르게 당겨도 정지해 있던 식기들이 그대로 정지해 있으려고 하기 때문'이라고 추측하였다.

위에서 영희의 추측은 과학적 가설을 제안한 활동이라기 보다는 과학적 설명을 한 활동이라고 할 수 있다. 설명해야 할 현상(왜 식기가 그대로 있는지)에 대해 이미 일반법칙(관성의 법칙)이 주어져 있었고, 그로부터 연역적인 결론을 내린 것(식기는 처음에 정지해 있었으므로 계속 정지해 있으려고 한다)이므로, 과학적 설명을 한 것이다. 만일, 관성의 법칙이 주어지지 않았거나 영희가 관성의 법칙을 모르고 있는 경우에는 왜 식기가 그대로 식탁 위에 있는지를 설명하기 위해 나름대로의 이유를 제시해야 하고, 그것이 과학적 설명가설을 제안한 것이라고 할 수 있다. 그러한 설명가설은 아직 참임을 보장받을 수 없으므로 실험적인 검증을 필요로 한다.

어떤 현상이 왜 일어났는지에 대한 설명가설을 제안할 때에는 인과적 관련성이 포함되는 것이 중요하다. 다음과 같은 예를 보자.

어느 지역에 몇 년 전 큰 인공 호수가 만들어졌다. 그 이후 이 지역의 쌀 수확량은 크게 줄었다. 이 지역에 있는 한 학교의 학생들은 쌀 수확량의 감소가 인공 호수의 건설 때문이라고 생각하고 이를 탐구하고자 하였다. (p. 32)³⁾

위 예에서는 쌀 수확량의 감소가 인공 호수때문이라는 설명을 제시하였지만, 인공호수와 쌀 수확량 감소와의 관계에 대한 보다 인과적 관계, 즉 왜 인공호수가 쌀 수확량의 감소에 영향을 미치는지에 대한 설명이 제시되어 있지 못하므로 좋은 과학적 설명가설이라고 보기 힘들다.

3. 과학적 예측가설과 과학적 예측
과학적 예측

과학적 설명에 대한 논의를 하면, 과학적 예측에 대한 논의도 하게 된다. 왜냐하면, 과학적 예측의 구조가 과학적 설명과 마찬가지로 연역적인 구조로 되어 있기 때문이다. 예를 들어, 포퍼(Popper, 1968)는 다음과 같이 말했다.

완전한 인과적 설명의 필요조건적 구성요소인 두 가지 상이한 유형의 언명들이 있다. 그것들은 (1) 보편언명들, 즉 자연법칙의 성격을 갖는 가설들과, (2) 단칭언명들, 즉 문제되고 있는 구체적 사건에 적용되는 것으로 필자가 초기조건들이라고 부르는 것이다. 보편언명들과 초기조건들로부터 연역적으로 우리는「이 실은 끊어질 것이다」라는 단칭언명을 연역한다. 우리는 이 언명을 구체적 또는 단칭적 예측이라고 한다.” (p. 60)

좀 더 구체적인 예를 3단 논법으로 제시하면 다음과 같다.

전제 1 : 자기장이 변화하면, 전류가 생긴다. (패러데이 법칙)

전제 2 : 동근 코일 안으로 자석을 넣었다가 뺐다가 하면서 자기장을 변화시킨다. (초기조건)

결론 : 동근 코일 안으로 자석을 넣었다가 뺐다가 하면, 코일에 전류가 생길 것이다. (예측)

과학적 예측이란, 과학적 설명과 마찬가지로 일반법칙과 초기조건들로부터 연역적인 결론을 이끌어내는 과정이지만, 과학적 설명과 다른 점은 아직 실제 현상이 일어나지 않았다는 것이다. 이에 대해 험펠(Hempel, 1965)은 다음과 같이 언급하였다.

예측과 설명의 차이는 실제적(pragmatic) 성격에 있을 뿐이다. E(현상)⁴⁾가 주어지면, 즉 만일 우리가 E로 기술되는 현상이 일어났다는 것을 안다면, 그리고 C1, C2 ... (초기조건들), L1, L2 ... (일반법칙들)와 같은 적절한 일련의 언명이 그 후에 제시되었다면, 우리

3) ㄱ 출판사 「공통과학」에서 발췌한 내용임.

4) 괄호 안은 저자가 임의로 삽입한 것임.

는 그 현상을 설명할 수 있다. 만일 후자의 언명(일반법칙과 초기조건들)이 먼저 주어지고, 그것이 기술하는 현상의 발생이 그 후에 이끌어 내어지면, 우리는 예측을 할 수 있다. (p. 249)

과학적 예측가설

과학적 설명과 과학적 예측이 서로 밀접한 관계이므로 과학적 가설의 경우에도 과학적 설명가설을 논의하였다면, 과학적 예측가설에 대해서 생각해 볼 수 있다. 다음과 같은 예를 보자.

김선생님은 구리봉을 수직으로 들고, 자석을 구리봉 안에서 떨어뜨리면 자석이 어떻게 떨어질 것인지를 학생들에게 물었다. 영희는 '자석이 구리봉 안에서 공기 저항을 받기 때문에 구리봉 안에서 자석이 천천히 떨어질 것'이라고 추측하였다.

과학적 예측가설이란, 과학적 설명가설과 마찬가지로 어떤 현상에 대한 인과적으로 설명하기 위해 제안된 임시적인 해이지만, 아직 그 현상이 일어나지 않았다는 점에서 과학적 설명가설과 차이가 있다. 즉, 위의 경우에서 영희는 자석이 천천히 떨어질 것이라는 예측을 하면서, 왜 그러한 예측을 하게 되었는지를 공기의 저항 때문이라고 설명하고 있기 때문에 영희의 추측은 과학적 예측가설의 조건을 만족하고 있다. 물론, 참임을 보장받을 수 없으므로 실험적 검증을 필요로 하며, 위의 경우에는 물리적으로 틀린 가설임을 알 수 있다.

이때 과학적 예측과 과학적 예측가설과의 차이는 과학적 설명과 과학적 설명가설간의 차이와 같다. 이미 주어진 상황에 대한 일반법칙이 주어지고 그로부터 초기조건을 이용하여 아직 일어나지 않은 특정 현상을 예측하였다면, 그것은 과학적 예측이라고 할 수 있다. 그러나 일반법칙이 주어지지 않고, 스스로 예측에 필요한 법칙을 제안하여 그로부터 어떤 현상을 예측하였다면 그것은 과학적 예측가설이라고 할 수 있다. 좀 더 분명히 하기 위해 다음 예와 비교해 보자. 다음 예에서 철수의 추측은 과학적 예측인가? 과학적 예측가설인가?

철수는 피스톤을 이용한 실험을 통해 온도가 일정할 때, 공기의 부피는 압력의 크기에 반비례한다는 보일의 법칙을 알게 되었다. 실험 후 선생님은 풍선이 하늘 높이 올라가면, 어떻게 될 것인지 보일의 법칙을 적용하여 생각해 보라고 하였다. 이에 대해 철수는 '풍선이 높이 올라가면 기압이 낮아지므로, 부피가 팽창해서 풍선이 터지게 될 것'이라고 추측하였다.

구리봉 안에서 떨어지는 자석의 운동과 달리, 풍선에 대한 철수의 추측은 연역적인 사고만을 포함하고 있다. 즉, 이미 주어진 보일의 법칙과 풍선이 높이 올라가면서 기압이 낮아진다는 초기조건으로부터 연역적으로 풍선의 부피가 팽창해서 터질 것이라는 예측을 한 것이다. 그에 반해, 구리봉 안에서 떨어지는 자석의 운동을 예측하기 위해서 영희는 관련 법칙(물체가 낙하할 때에는 공기저항을 받는다)을 찾아 제안해야 했다. 일단 관련법칙이 제안되어야 그것과 초기조건(가는 구리봉 안으로 자석을 떨어뜨렸다)으로부터 연역적으로 '자석이 천천히 떨어질 것'이라는 예측이 가능해 지는 것이다.

4. 귀납적 일반화와 과학적 가설

과학적 가설의 특성을 논의하면서 혼동하기 쉬운 것 중의 하나는 인과적 설명을 포함하지 않는 기술적(descriptive) 형태의 추측이다. 기술(description)이란, 일어난 현상을 있는 그대로 서술한 것이며, 왜 그러한 현상이 일어났는지에 대한 인과적 설명(explanation)이 포함되어 있지 않다.

예를 들어, 어떤 비료와 어떤 식물의 성장과의 관계에 대해서, '비료 X는 식물 Y가 성장하는데 좋은 것이다'라고 하였다고 하자. 그러면 우리는 왜 비료 X가 식물 Y의 성장에 좋은지를 질문할 수 있다. 이때 그 질문에 대해서 왜 비료 X가 식물 Y의 성장에 도움이 되는 지에 대한 진술이 포함된다면 우리는 이것을 과학적 가설로 볼 수 있다. 그러나, 왜 비료 X는 식물 Y가 성장하는데 좋은 지에 대한 인과적 설명이 없이 단순히 위와 같은 형태의 기술적 진술이라면 이것은 과학적 가설이라고 보기 힘들다.

이러한 점은 학생들에게 과학적 가설의 제안을 지도하는 데에도 시사점을 준다. 다음과 같은 실험 활동 예를 보자.

학년 인원을 A, B, C, D 4개조로 나누어 각 조마다 다음 실험을 위한 실험 설계를 하여 보자. 이 실험을 하기에 앞서 가설을 세워보자.

실험 제목 : 물체가 물 속에서 바닥까지 떨어지는 데 걸리는 시간은 물체마다 다를까? 다르다면, 무엇에 따라 다를까?

학생들: (각 조마다 가설을 설정하고 대표가 발표를 한다)

A조 : 물체의 질량이 클수록 빨리 가라앉을 것이다. (PP. 21-22)⁵⁾

위 실험에서 우리는 A조에게 왜 질량이 크면 빨리 가라앉는 지를 물을 수 있다. 이때 학생들은 질량과 가라앉는 정도와의 관계에 대한 인과적인 설명을 제시할 수 있어야 한다. 만약 학생들이 인과적인 설명을 제시하지 못한다면, 우리는 학생들이 어떠한 근거로 그러한 추측을 하게 되었는지 알 수 없으며, 따라서 학생들의 추측은 단순한 추측과 구분할 수 없게 된다. 이와 같이 현상에 대한 인과적 설명이 포함될 때 과학적 가설 (위 실험의 경우에는 과학적 예측가설)을 제안하였다고 할 수 있다 (Lawson, Abraham, & Renner, 1989).

물론, 웬햄(Wenham, 1993)은 비료와 식물성장과의 관계에 대한 앞선 형태의 진술을 '기술적 가설'이라고 하기도 하였다. 그리고 이러한 기술적 가설이 일반적인 학교에서의 탐구활동에서 필요하다고 하였다. 그러나, 두 변인간의 관계에 대한 단순한 기술적 표현은 막연한 추측과 구분하기 어렵고, 따라서 의미 있는 과학적 탐구 활동으로는 부족하다. 왜 두 변인간의 관계가 그러한지에 대한 이유를 제한하고 고안하는 것은 과학적 탐구활동에서 중요한 측면이기 때문이다. 또 다음과 같은 예를 보자.

순수한 물 50ml를 가열하였을 때, 100℃에서 끓었다. 이번에는 순수한 물 100ml를 가열하였더니 역시 100℃에서 끓었고, 200ml를 가열하여도 100℃에서 끓었다. 따라서 영호는 '모든 순수한 물은 가열하면 100℃에서 끓을 것이다'라고 추측을 하였다.

위의 예에서 영호의 추측 역시 기술적(descriptive)이다. 특히 이 경우에 영호의 추측은 귀납적 일반화(inductive generalization)로서, 단지 물이 100℃에서 끓는다는 현상을 일반화하여 기술하고 있을 뿐 순수한 물이 왜 100℃에서 끓는지를 설명하지 않고 있다(Lawson, 1995). 이러한 점에서 귀납적 일반화는 과학적 가설과 구분된다. 이러한 구분에 대해 다리안(Darian, 1995)은 다음과 같이 언급하였다.

귀납 추리는 많은 특정 사건들로부터 보편성으로 가는 것이다. 그것은 한 집합 속의 모든 구성원들에 대한 일반화이다. 그것은 일반화의 특성을 나타내지만, 가설은 그렇지 않다. 귀납추리는 특정사건들로부터 일반화로 가는 추리이지만, 가설은 효과로부터 원인으로 가는 추리이다. 귀납을 분류화를 하지만, 가설은 설명을 한다.

마찬가지로 영호가 50ml와 100ml, 그리고 200ml의 물이 100℃에서 끓었다는 사실로부터 '이 물도 가열하면 100℃에서 끓을 것이다'라고 예측하였다면, 그것은 귀납적 일반화(모든 순수한 물은 100℃에서 끓는다)에 기초하여 연역적으로 과학적 예측을 한 것이다. 따라서 그러한 추측도 과학적 가설이라고 할 수는 없다.

5. 과학적 가설의 조건

보다 좋은 과학적 가설이기 위한 조건으로 무엇을 들 수 있는가? 먼저 다음과 같은 한 천문학자의 추측을 생각해 보자.

우주의 별은 매우 많다. 그 많은 별 중에 외계인은 있

5) ㄱ 출판사 「공통과학」에서 발췌한 내용임.

올까? 없을까? 그 이유는 무엇일까? 이러한 질문에 대해 어떤 천문학자는, '별 중에서 지구의 환경과 같은 별도 있을 수 있다. 따라서, 우주에는 외계인이 분명히 살 것이다. 만일 외계인이 살지 않다면 그것은 너무도 많은 공간의 낭비일 뿐이다' 라고 추측하였다.

너무나도 넓은 우주 공간에 외계인이 살지 않는다면, 그것은 공간의 낭비이기 때문에 우주에는 외계인이 살 것이라는 추측은 과학적 가설이라고 할 수 있겠는가? 이러한 경우에 추측을 위한 근거가 과학자 자신의 믿음이나 신념에 기초하고 있을 뿐, 충분한 과학적 근거를 제시하지 못하고 있다. 실제로 위와 같은 주장에 대해 많은 과학자들이 수긍하지 않을 수도 있을 것이다. 이와 같이, 보다 좋은 과학적 가설이기 위해서는 충분한 과학적 근거가 있어야 한다는 조건을 첫째로 들 수 있다. 그리고 다음과 같은 예를 또 보자.

파동은 매질을 통해 전파된다. 음파는 공기의 진동을 통해서, 지진파는 땅의 진동을 통해서, 수면파는 물의 진동을 통해서 전파된다. 빛도 파동이다. 따라서 빛은 매질을 통해 전파될 것이다. 단 빛의 매질은 만질 수도 볼 수도 없고 어떠한 검출기로도 검출되지 않는 물질로 되어 있을 것이다.

이와 같이 빛이 어떻게 전파해 나가는 지를 설명하기 위해 제안한 '만질 수도 볼 수도 없고 어떠한 검출기로도 검출되지 않는 물질'의 존재를 제안한 것은 과학적 가설이라고 할 수 있는가? 이러한 경우에도 역시 제안된 추측이 과학적으로 검증가능하지 않다는 이유로 좋은 과학적 가설이라고 할 수 없다. 따라서 좋은 과학적 가설의 두 번째 조건으로 검증가능해야 한다는 것을 들 수 있다.

과학적 가설이란 반증될 수 있을 뿐, 확증될 수 없다는 포퍼(Popper, 1968)의 관점에 따르면, 검증가능해야 한다는 조건은 반증가능해야 한다는 조건으로 표현될 수 있다. 간단히 반증가능하지 않은 가설의 예를 요약하면 다음과 같다(Chalmers, 1986).

- (1) '비가 오거나 오지 않거나이다'와 같이 논리적으로 반증이 불가능한 경우
- (2) '유클리드 기하학에서 원주상의 모든 점은 중심에서 등거리에 있다'와 같이 정의(definition)로서 필연적인 참인 경우
- (3) '모험적인 투기에서 행운이 온다'와 같이 '모험'이나 '행운'의 기준이 모호하여 반증이 어려운 경우 (p. 40)

나아가, 반증가능성이 높을수록 보다 좋은 과학적 가설이라고 지적하고 있다. 즉 '모든 행성은 태양 주위를 궤도 운동한다'는 것보다 '모든 행성은 태양 주위를 타원궤도 운동한다'는 진술이 정확성과 명확성의 정도가 높다는 측면에서 반증 가능성이 높고 따라서 보다 좋은 과학적 가설이라고 하였다.

위의 조건들을 만족하더라도 주어진 현상에 대한 가능한 설명은 논리적으로는 무한대일 수 있다. 따라서 가능한 가설들 중에서 무엇이 좋은 과학적 가설인지에 대한 기준에 대한 관심도 있어왔다. 예를 들면, 커드 (Curd, 1989)는 가설을 제안하는 과정에서 '사전 평가의 논리(a logic of prior assessment)'가 있을 수 있으며, 그러한 논리에는 '확률의 논리(a logic of probability)'와 '추구의 논리(a logic of pursuit)'가 포함된다고 제안하였다. 여기에서 확률의 논리란, 적어도 기존의 알려진 현상이나 데이터, 결과나 법칙에 비추어 보았을 때, 보다 더 참일 확률이 높은 가설이 좋은 과학적 가설이라는 것이다. 또한 추구의 논리란, 설명력이 있다든가, 단순하다든가, 다른 과학에서 유용하다든가와 같은 실용적인 측면에서의 필요성을 만족했을 때 좋은 가설이라고 볼 수 있다는 것이다.

이 외에 퀸과 조지 (Quinn & George, 1975)는 수용 가능한 과학적 가설의 조건으로 다음 5가지를 제시하기도 하였다: (1) 의미를 포함하고 있다, (2) 경험에 기초하고 있다, (3) 적절한 근거가 있다, (4) 정확하다, (5) 검증을 할 수 있다. 그리고 학생들의 가설 제안 활동에서 좋은 과학적 가설인지 아닌지를 평가하기 위한 5가지 준거도 제시하였다: (1) 설명을 포함하고 있지 않으면 0점, (2) 비과학적인 단순 이유

만 제시하고 있으면 1점, (3) 부분적으로 과학적 설명이 포함되어 있으면 2점, (4) 변인간의 과학적 설명이 제시되어 있으면 3점, (5) 과학적 설명이 정성적 또는 정량적으로 자세하게 제시되어 있으면 4점, (6) 명확하게 검증가능하면 5점.

6. 과학적 가설의 생성과정과 귀추적 (Abductive) 사고

과학적 가설의 생성과정에 대한 논의는 아직 합의되어 있지 않다. 예를 들면, 포퍼 (Popper, 1965)는 “새로운 생각을 갖는 논리적 방법이라든가 이 과정의 논리적 재구성이라든가 하는 따위는 존재하지 않는다”(p. 32)고 강조하면서, 과학철학의 대상은 가설의 생성과정이 아닌 검증과정이라고 하였다. 또 아킨스타인(Archinstein, 1985)은 “적절한 가설을 제시하는 것은 법칙에 의해서 구성될 수 없으며, 창의적인 재능이 없이는 될 수 없다”는 웨웰(Whewell)의 말을 인용하였다. 이러한 관점은 실제 과학자의 관점에서도 볼 수 있다. 예를 들어, 파인만(Feynman, 1965)은 과학적 가설의 생성과 검증과정을 언급하면서, 가설의 생성은 단지 추측에 의한다고만 하였다.

그러나 헨슨(Hanson, 1989)은 위와 같은 포퍼의 관점을 비판하면서 아리스토텔레스나 퍼스(Pierce)가 말한 발견의 과정이 합리적일 수 있다고 강조하였다. 즉 퍼스는 새로운 가설의 생성 과정에 심리적인 요소가 포함되어 있음을 인정하지만, 가설 생성과정은 논리적인 과정이라고 본다. 따라서 커드(Curd, 1989)는 이러한 퍼스의 관점에 따라 새로운 가설이 제안되는 과정을 다음과 같이 제시하였다.

놀라운 사실 C가 관찰되었다.

가설 A가 C를 설명할 수 있다.

그리고 가설 A를 추구할만한(따를만한) 겉보기에 그럴듯한 근거가 있다.

여기에서도 가설은 새로운 현상을 설명하기 위해 제안되는 것으로 보고 있음을 알 수 있다. 즉, ‘놀라운’ 사실이란, 예상치 못했던, 또는 왜 그런지 설명되

지 않은 현상이라는 점을 강조하고 있으며, 따라서 왜 그러한 사실이 일어났는지에 대한 설명이 필요하다는 것을 강조하고 있다. 또 한가지 주목할 점은, 새로운 가설의 제안이 단순한 추측이나 영감이 아닌 겉보기에 그럴듯한 근거를 가지고 제안되었다는 것이다. 단지 여기에서 ‘겉보기에 그럴듯’하다고 한 이유는 아직 C를 설명할 수 있는 다른 가설이 있을 수 있고, 그 가설을 추구할만 하다는 또 다른 근거도 있을 수 있기 때문이다. 이러한 관점에 따라 과학적 가설, 특히 과학적 설명가설의 생성과정을 요약하여 제시하면 다음 4단계와 같다.

1단계 : 어떤 새로운 현상의 관찰

2단계 : 관찰된 현상에 대한 원인적 질문의 제기

3단계 : 질문에 답하기 위한 추가 정보의 탐색 및 수집을 통한 추론

4단계 : 원인적 질문에 대한 임시적 해(solution)로서의 설명가설의 제안

예를 들어, 어떤 학생이 구리봉 안에서 떨어뜨린 자석이 천천히 떨어지는 현상을 새롭게 관찰하고(1단계), 왜 구리봉에는 자석이 붙지 않는데 자석이 구리봉 안에서 천천히 떨어질까 라는 원인적 질문을 제기하였다고 하자(2단계). 그 학생은 일반적으로 물체가 공기저항을 받는다는 사실을 기억해 내면서(3단계), 좁은 구리봉 안에서 자석이 공기저항을 많이 받아 천천히 떨어지는 것이라는 설명을 제안할 수 있을 것이다(4단계). 또는 다른 플라스틱 봉 안에서 자석을 떨어뜨려 보았을 때에는 빨리 떨어지는 현상을 추가로 관찰하고, 또 코일 안에서 자석을 움직이면 전류가 생겼던 현상을 기억하면서(3단계), 구리봉에서는 플라스틱 봉과 달리 도체이므로 유도전류가 생겨 자석의 운동을 방해하기 때문이라는 설명을 제안할 수도 있을 것이다(4단계).

여기에서 중요한 것이 바로 3번째 단계에서의 사고이다. 바로 이 단계에서 설명가설이 어떻게 제안되고 있는지를 보여주고 있기 때문이다. 이 단계에서 퍼스(Pierce)가 말한 귀추적 사고(abductive thinking)를 하게 된다. 즉, 귀추(abduction)란, ‘이미 알려진

다른 현상에 대한 설명방식을 아직 설명되지 않은 새로운 현상에 빌려와 새로운 설명을 제안하는 사고'로 정의할 수 있다. 귀추적 사고에 대한 헨슨(Hanson, 1961)의 설명을 보면 다음과 같다.

케플러는 마침내 진정한 궤도에 도달하기까지의 전과정에서 그의 예리한 논리적 감각을 보여주었다. 이것이 바로 지금까지 수행된 귀추적 사고 중에서 가장 훌륭한 예이다. [중략] ... 케플러가 이끌어 왔던 귀추적 추론의 특징은 무엇인가? [중략] ... 그것은 연역적 추론이 아니었다. [중략] ... 그렇다고 그것들은 귀납적인 것도 아니었다. [중략] ... 아리스토텔레스는 추론의 형태를 열거한 바 있는데, 그것은 연역, 귀납, 그리고 〈 〉라고 불리는 것이었다. 이 중 세 번째 것은 환원(reduction)으로 번역되었으며, 퍼스(Pierce)는 다시 이것은 abduction(귀추) 또는 retroduction으로 불렀다. [중략] ... (그리고 퍼스는 다음과 같이 설명하였다) 과학의 모든 아이디어들은 귀추를 통해서 얻어진다. 귀추는 사실을 언급하고, 그것들을 설명하는 이론을 고안하는 것으로 구성된다. [중략] ... 데이터 (또는 자연현상)에 관해 이러한 방식으로 추론할 수 있다는 것을 물리학자들이 인식하게 될 때 결정적인 순간이 온다. (가설) H를 가정함으로써 여러 가지 현상들 p를 하나의 이해 가능한 패턴으로 설명할 수 있다. [중략] ... 귀추는 하나의 사실을 관찰한 다음 그 사실을 야기시킨 것이 무엇인지를 말하도록 하는 것이다. (pp. 85-89)⁶⁾

그러나, 퍼스나 헨슨이 말한 귀추적 사고만이 과학적 설명가설의 생성과정, 나아가 새로운 과학 이론의 발견과정을 잘 설명해 주는 것은 아니다. 예를 들어, 월라스(Graham Wallas, 1926)는 가설 생성과정을 (1) 준비(preparation), (2) 계획(incubation), (3) 예시(illumination)의 3단계로 제시하기도 하였다. 또, 다든(Darden, 1992)은 계산적 과학철학(computational philosophy of science)의 관점에서 기초해서 발견의 과정을 문제해결과정과 인지과학에

서의 인공지능 이론과 접목하여 새로운 설명을 시도하기도 하였고, 라글리 등(Lagley et al., 1987)도 발견의 과정을 문제 해결의 특수한 형태로 보고 연구한 바 있다. 이 외에도 심리학 분야에서의 비유 추론을 통한 발견의 과정(Hesse, 1966; Holyoak & Thagard, 1989)에 대한 연구, 개념적 조합을 통한 발견의 과정에 대한 연구(Thagard, 1988)들도 새로운 설명가설의 생성과정에 대한 연구와 밀접한 연관성을 가지고 있다.

또, 가설 생성의 근원에 대한 논의도 여러 가지가 있다. 예를 들어, 밀(Mill, 1950)은 가설은 단지 추측으로서 인간의 상상에 의한다고 하였지만, 매이든(Madden, 1960)은 직관, 시행착오, 과거의 경험, 사건, 상상이나 꿈 등과 같은 보다 구체적인 기원의 예를 제시하였다. 또 와르토프스키(Wartofsky, 1968)도 비유와 은유, 원형 패턴의 회상 등을 가설의 기원으로 들기도 하였다.

본 연구에서는 과학적 설명가설의 생성과정에 대한 기초연구로서 과학적 가설의 정의와 특성에 대한 연구이므로, 과학적 가설의 생성과정에 대한 보다 깊은 논의는 다음 연구에서 진행될 것이다.

III. 요약 및 결론

본 연구에서는 과학적 가설의 정의와 특성, 그리고 가설의 생성과정과 과학적 가설의 생성과 관련한 과학적 사고에 대해서 논의하였다. 특히, 과학적 설명가설과 과학적 설명, 과학적 예측가설과 과학적 예측과의 차이를 논의하였고, 귀납적 일반화와의 차이도 논의하였다. 이에 대한 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 과학적 가설에는 과학적 설명가설과 과학적 예측가설이 있다.
- 과학적 설명가설이란, 어떤 현상이 왜 일어났는지를 인과적으로 설명하기 위해 제안된 임시적인 해라고 정의할 수 있다.
- 과학적 설명은, 일어난 현상을 설명하기 위한 보편

6) 괄호 안은 저자가 임의로 삽입한 것임.

법칙이 주어져 있는 경우이며, 보편법칙과 초기조건으로부터 연역적인 사고를 통해 행해진다.

- 과학적 설명가설은, 일어난 현상을 설명하기 위해 보편법칙을 귀추적 사고를 통해 새롭게 제안하는 경우이다. 일단 가설이 제안되면, 가설과 초기조건으로부터 현상을 설명하게 된다.
- 과학적 예측은, 일어날 현상을 예측하기 위한 보편법칙이 주어져 있는 경우이며, 보편법칙과 초기조건으로부터 연역적인 사고를 통해 행해진다.
- 과학적 예측가설은, 아직 일어나지 않은 현상을 예측하기 위해, 보편법칙을 귀추적 사고를 통해 새롭게 제안하는 경우이다. 일단 가설이 제안되면, 가설과 초기조건으로부터 현상을 예측하게 된다.
- 현상을 기술하는 경우에는 과학적 가설이라고 하지 않는다. 따라서, 귀납적 일반화에 의해 보편법칙의 제안한 경우에는 과학적 가설을 제안한 경우가 아니다.
- 좋은 과학적 가설이기 위해서는, 과학적인 근거가 있어야 하고 실험적으로 검증가능해야 한다. 또는 반증가능해야 하고, 반증가능성이 높을수록 좋은 과학적 가설이라고 할 수 있다.
- 좋은 과학적 가설이기 위한 조건에는 이 외에 여러 가지가 있을 수 있는 데, 예를 들어 단순성, 일관성, 다른 현상에의 적용가능성 등이 있다.
- 과학적 가설의 생성은 귀추적 사고에 의한다고 볼 수 있으나, 그 외에도, 비유추론, 상상, 과거의 경험, 꿈이나 직관, 원형 패턴의 회상 등과 같은 여러 가지 추론 방식이 있을 수 있다.

과학적 탐구기능의 지도를 위해서는 '과학적 설명하기' 나 '과학적 예측하기'와 마찬가지로 '과학적 가설 제안하기' 와 같은 탐구활동이 강조된다. 그렇다면 우리는 어떤 활동이 과학적으로 설명하는 활동이고, 어떤 활동이 과학적 가설을 제안하는 활동인지를 명확하게 이해할 필요가 있다. 본 연구에서는 주어진 일반법칙으로부터 연역적 사고를 통해 현상을 설명하도록 하는 것(과학적 설명하기)과 현상을 설명하기 위해 귀추적 사고를 통해 나름대로 설명이론을 제안하는 것(과학적 설명가설 제안하기)을 구분하였

다. 마찬가지로, 주어진 법칙으로부터 아직 일어나지 않은 현상을 추측하는 활동(과학적 예측하기)과 앞으로 일어날 활동을 예측하기 위해 필요한 법칙을 제안하는 활동(과학적 예측가설 제안하기)도 구분하였다. 그리고 과학적 설명과 예측에서의 과학적 사고(연역적 사고)가 과학적 가설을 제안할 때의 과학적 사고(귀추적 사고)와 어떻게 다른지도 논의하였다.

학교 실험에서 많은 경우에 두 변인들간의 관계를 세우거나 예측하는 활동이 많이 있는데, 이 경우에도 변인들간의 관계에 대해 단순하게 기술하는 것을 넘어서서, 인과적 관계를 제시하도록 할 때 보다 의미 있는 '과학적 설명가설 (또는 예측가설) 제안하기' 활동이 될 수 있음을 지적하였다. 그리고 이 외에도 좋은 과학적 가설이기 위한 준거들을 살펴보았다.

이와 같이, 과학적 설명가설과 제안가설에 대한 본 연구에서의 논의는 현재 과학교육 현장에서 이루어지고 있는 '과학적 가설 활동'이 의미있는 과학적 가설 활동인지, 부족한 측면이나 잘못된 측면은 없는지를 분석하고, 의미있는 과학적 가설 활동을 개발하고 제안하는데 기초로 활용될 수 있을 것이다.

마지막으로 본 연구를 기초로 하여 실시 중인 후속 연구는 다음과 같다.

- 고등학교 공통과학 교과서에서의 가설 설정 활동에 대한 분석 연구
- 과학적 가설의 특성에 대한 이해를 위한 교사 연구 자료의 개발과 실시 및 평가
- 개념변화과정에서 새로운 현상을 설명하기 위해 제안된 학생들의 설명가설의 특성 분석과 설명가설의 생성과정에 대한 연구

적 요

과학적 가설의 생성은 과학적 탐구활동뿐 아니라, 개념변화과정에서 중요한 활동 중의 하나이다. 본 연구에서는 과학적 가설을 설명가설과 예측가설로 나누었고, 각각의 경우에 과학적 설명이나 과학적 예측과 어떻게 다른지를 분석 논의하였다. 또한 현상을 기술만 하고 있는 추측의 경우를 과학적 가설로 보지 않

음으로서, 귀납적 일반화에 의한 보편법칙의 제안을 과학적 가설로 보지 않는다고 논의하였다. 과학적 가설의 제안에 필요한 과학적 사고로서 귀추적 사고의 특징을 논의하였으며, 그에 기초한 과학적 설명가설의 생성과정을 4단계로 제시하였다. 마지막으로 본 연구로부터 수행중인 후속 연구 방향을 제시하였다.

참 고 문 헌

- 강만식, 정광희, 이원식, 홍승수, 이창진, 장병기, 윤용 (1996) *고등학교 공통과학*, 서울: 교학사.
- 권용주, 양일호, 정원우 (2000). 예비 과학교사들의 가설 창안과정에 대한 탐색적 분석. *한국과학교육학회지*, 20(1), 29-42.
- 김시중, 박승재, 이학동, 문정대, 우종욱, 정봉호, 정완호, 채우기, 민경적, 오희균, 성민웅, 이상진, 김종섭, 송진웅, 김영수, 지원균 (1996) *고등학교 공통과학*, 서울: 금성출판사.
- 박종원 (1998). 과학활동에서 연역적 사고의 역할. *한국과학교육학회지*, 18(1), 1-18.
- Achinstein, P. (1985). The method of hypothesis: What is it supposed to do, and can it do it? In P. Achinstein & O. Hannaway (Eds.), *Observation, experiment, and hypothesis in modern physical science*. London: The MIT Press.
- Chalmers, A.F. (1978). *What is this thing called science?* Open University Press.
- Curd, M.V. (1989). The logic of discovery: An analysis of three approaches. In B.A. Brody & R.E. Grandy (Ed.), *Readings in the philosophy of science* (2nd ed.) (pp 417-430), New York: Prentice Hall, Inc.
- Darden, R. (1992). Strategies in anomaly resolution. in R. Giere (Eds.), *Cognitive Models of Science*, (pp.251-273). Minnesota: University of Minnesota Press.
- Darian, S. (1995). Hypotheses in introductory science texts. *International Review of Applied Linguistics in Language Teaching*, 33(2), 83-109.
- Driver, R. (1988). *The pupil as scientist?* Milton Keynes: Open University Press.
- Edington, J.R. (1997, March). *What constitutes a scientific explanation?* Paper presented at the annual meeting of the National Association for research in Science Teaching (NARST), Oak Brook, IL.
- Feyerabend, P. (1975). *Against method*. London: Verso Publishing.e MIT Press.
- Feynman, R. (1965). *The character of physical law*. Cambridge: T
- Germann, P.J., Odom, A.L., Aram, R., & Burke, G. (1996). Students performance on asking questions, identifying variables, and formulating hypotheses. *School Science and Mathematics*, 96(4), 192-201.
- Hanson, N.R. (1961). *Patterns of Discovery*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Hanson, N.R. (1989). Is there a logic of scientific discovery? In B.A. Brody & R.E. Grandy (Ed.), *Readings in the philosophy of science* (2nd ed.) (pp 398-409), New York: Prentice Hall, Inc.
- Hempel, C.G. (1965). *Aspects of scientific explanation*. New York: Free Press.
- Hempel, C.G. (1966). *Philosophy of Natural Science*. Prentice-Hall.
- Hesse, M. (1966). *Models and analogies in science*. Notre Dame, Ind.: University of Notre Dame Press.
- Holyoak, K.J., & Thagard, P. (1989). Analogical mapping by constraint satisfaction. *Cognitive Science*, 13, 295-355.
- Klahr, D., & Dunbar, K. (1988). Dual space search during scientific reasoning. *Cognitive Science*, 12, 1-48.
- Kuhn, T.S. (1970). *The sturcture of scientific*

- revolutions (2nd ed.). The University of Chicago Press.
- Lakatos, I. (1995). *The methodology of scientific research programmes : Philosophical papers volume 1*, edited by J. Worrall & G. Currie. Cambridge University Press.
- Langley, P., Simon, H.A., Bradshaw, G.L., & Zytkow, J.M. (1987). *Scientific discovery: Computational explanations of the creative processes*. London: The MIT Press.
- Lawson, A. (1995). *Science teaching and the development of thinking*. Wadsworth Publishing Company.
- Lawson, A.E., Abraham, M.J., & Renner, J.W. (1989). *A theory of instruction: Using the learning cycle to teach science concepts and thinking skills*. National Association for Research in Science Teaching Monograph, No. 1.
- Madden, E. (1960). *The structure of scientific thought*. Boston: Houghton Mifflin.
- Martin, M. (1972). *Concepts of science education: A philosophical analysis*. London: Scott, Foresman and Company.
- Mill, J.S. (1950). *Philosophy of scientific method* (Edited by E. Nagel). New York: Hafner.
- Millar, R. (1989). What is scientific method and can it be taught? in J. Wellington (Ed.), *Skills and processes in science education: A critical analysis* (pp. 47-62). London: Routledge.44
- Park, J., Kim, I., Kim, M., & Lee, M. (1997). *Analysis of the students' process of confirmation and falsification of hypotheses in electrostatics*. Paper presented at the Annual conference of the Australasian science education research association (ASERA). Adelaide, Australia.
- Park, J., & Han, S. (unpublished). Using deductive reasoning to promote the change of students' conceptions about force and motion. *International Journal of Science Education*.
- Pierce, C.S. (1931). *Collected Papers, Vol 1, Sec. 188*. Cambridge: Harvard University Press.
- Poincare, H. (1952). *Science and hypothesis*. New York: Dover.
- Popper, K. (1968). *The logic of Scientific Discovery*. Harper & Row, Publishers.
- Quinn, M.E., & George, K.D. (1975). Teaching hypothesis formation. *Science Education*, 59(3), 289-296.
- Rief, F., & Larkin, J.H. (1991). Cognition in scientific and everyday domains: Comparison and learning implications. *Journal of Research in Science Teaching*, 28(9), 733-760.
- Screen, P. (1989). *Warwick process science*. Southampton: Ashford Press.
- Tharard, P. (1988). *Computational philosophy of science*. Cambridge: MIT Press.
- Wartofsky, M. (1968). *Conceptual foundations of scientific thought*. London: MacMillan.
- Wallas, G. (1926). *The art of thought*. New York: Harcourt Brace Jovanovich.
- Wenham, M. (1993). The nature and role of hypotheses in school investigations. *International Journal of Science Education*, 15(3), 231-240.