

과학적 창의성 모델의 제안 -인지적 측면을 중심으로-

박 종 원
(전남대학교)

A Suggestion of Cognitive Model of Scientific Creativity (CMSC)

Park, Jongwon
(Chonnam National University)

ABSTRACT

Creative thinking alone can not lead to scientific creativity. Scientific knowledge and scientific inquiry skills are needed for scientific creativity. Focused only on cognitive aspect, I suggested a cognitive model of scientific creativity (CMSC) consisting of 3 components: thinking for scientific creativity, scientific knowledge contents, and scientific inquiry skills. Recently, many researchers have emphasized the various thinking for creativity as well as divergent thinking. Therefore, I suggested three types of creative thinking - divergent thinking, convergent thinking, and associational thinking - and discussed its rationale. Based on this model, an example of activity material for the scientific creativity was suggested. In the further research, based on CMSC, various activity types related to scientific creativity and concrete learning materials for scientific creativity will be developed.

Key words: scientific creativity, cognitive model, divergent, convergent, associative thinking, scientific inquiry process

I. 서 론

영재를 정의하는 중요한 한 요소인 창의성은 영재교육 분야에서 활발하게 논의되어 왔으며(Guilford, 1956; Renzulli, 1978; Ward *et al.*, 1999; Cropley & Urban, 2000), 현대 사회에서의 일반 과학교육 목표 중 하나라도 강조되어 왔다(McComark & Yager, 1989; 우종욱 등, 1994; 교육부, 1997).

이때 중요한 것은 창의성이 영역 의존적이라는 것이다(Alexander, 1992; Baer, 1999). 예를 들면, Gardner (1983)가 주창한 중다 지능(언어지능, 음악적지능, 논리수학적 지능, 공간지능, 신체운동지능 등) 이론에 의해서

도 과학적 창의성은 다른 분야에서의 창의성과 다를 수 있음을 시사하고 있다. 또 Wolpert(1992)는 예술적 창의성과 과학적 창의성을 다음과 같이 구별하였다:

“예술적 창의성은 예술가의 생각과 감정을 반영하며, 특성상 매우 개인적이다. 그와 반대로, 과학적 창의성은 항상 내적 일관성과 자연을 이해하려는 노력, 그리고 기존의 지식에 의해 제한받는다. ... 또한 과학자의 창의적 산출물은 궁극적으로는 교과서 내용과 같은 공적인 지식으로 동화된다. ... 예술에서의 창의적 산출물은 독특하고 내적인 경험에 대한 것이지만, 과학자들은 일반화를 위해 노력하고 특정 사례보다는 모든 경우에 적용될 수 있는 생

각에 관심이 있다. ... 끝으로, 과학적 활동에 대해서는 그것을 평가하기 위한 객관적이고 공유된 준거가 있지만, 예술에서의 창의적 산출물에 대해서는 그것을 평가하기 위한 확실한 방법이 없으며 다양한 해석만이 있을 뿐이다.”

(Wolpert, 1992, pp. 56-57)

실제로 Sternberg(1996)는 영역별 창의성들 간에 상관이 0.37로 낮게 나왔다고 보고하기도 하였다. 이에, Hu와 Adey(2002)는 과학 분야에서 창의성을 평가하기 위해 (창의적) 특성(trait)과 과정(process) 및 산출물(product)로 구성된 과학적 창의성 모델을 제시하고 그에 따라 평가 문항을 개발하여 연구한 바 있다. 그러나, 그들의 연구에서 제안한 과학적 창의성 모델에는 Guilford(1956)가 제시한 발산적 사고 (유창성, 융통성, 독창성)만이 포함되어 있어 창의성에 대한 최근의 다양한 관점이 포괄적으로 포함되지 못했다는 단점이 있다. 예를 들면, Cropley와 Urban(2000)은 창의적 산출물의 생성과정을 7 단계 (preparation-information-incubation-illumination-verification-communication-validation)로 나누면서, 초기 단계 (즉, 준비단계와 정보단계)에서는 수렴적 사고가, 부화(incubation) 단계에서는 발산적 사고뿐 아니라 연관적 사고가, 그리고 마지막 단계인 타당화(validation) 단계에서는 산출물의 적절성과 효과에 대한 판단 등이 중요하게 역할하는 것으로 기술하고 있다. Runco(1999)도 창의성은 발산적 사고뿐 아니라 논리적이고 수렴적인 사고도 필요로 한다고 강조하였다.

그리고 과학적 창의성이 구체적인 과학적 탐구활동 속에서 발현되는 것이라고 본다면, 과학적 창의성 모델에 과학적 탐구모형이 융합될 필요가 있는데 그들의 모델에는 과학적 탐구모형이 고려되지 못했다는 단점이 있었다.

따라서, 본 논문에서는 새로운 관점에서 과학적 창의성 모델을 제시하고, 그에 대한 근거를 논의하고자 한다.

과학적 창의성을 논의하기 위해서는 인지적 측면 뿐 아니라 다른 측면들도 함께 고려될 필요가 있다. 예를 들면, Sternberg(1999)는 창의적 사고가 지적 능력이나 지식과 같은 인지적 측면 외에 사고 스타일, 개인적 특성, 환경, 그리고 동기유발 등과 같이 정의적, 환경적 영향을 받는다고 강조하였고, Cropley(1999)도 창의성에 관련된 인성(personality)으로 유연성과 민감성, 그리고 확고한 자아등을 강조하였다. 또 과학적 창의성 활동에 취미와 여가생활이 중요한 역할을 한다고 강조하기도 한다(Root-

Bernstein, 1999). 과학적 창의성에 관련된 이러한 요소들을 모두 고려하면 연구의 범위가 매우 광범위해지므로, 연구의 출발점으로서 본 연구에서는 우선 인지적 측면에만 초점을 맞추어 논의하고자 한다.

Ⅱ. 본론 : 인지적 측면에서의 과학적 창의성 모델

인지적 측면에서의 과학적 창의성 모델을 개발하기 위해, 본 연구에서는 다음 3가지 관점을 취하였다.

- 과학적 창의성 모델은 인지 심리학적 측면뿐 아니라, 과학의 본성을 반영해야 한다. 따라서, 일반적 창의성에서 강조되어 왔던 발산적 사고뿐 아니라, 실제 창의적인 과학 활동을 하는데 중요한 역할을 하는 사고(thinking for scientific creativity)들이 포괄적으로 포함될 필요가 있다.
- 창의성은 내용 의존적이다. 따라서, 과학적 창의성 모델에는 과학지식내용(scientific knowledge contents)이 포함되어야 한다.
- 과학적 창의성은 구체적인 과학탐구활동 속에서 발현된다. 따라서, 과학적 창의성 모델에는 과학적 탐구기능들(scientific inquiry skills)이 포함되어야 한다.

이러한 기본 관점에 의해 개발한 인지적 측면에서의 과학적 창의성 모델(Cognitive Model of Scientific Creativity: CMSC)은 Fig. 1과 같다. 먼저 Fig. 1에서 제시한 “창의적 사고(Creative Thinking)”에 대한 구성요소를 설명하면 다음과 같다.

1. 창의적 사고 (Creative Thinking)

창의적 사고라고 하면 일반적으로 발산적 사고(divergent thinking)만을 말하기도 한다. 그러나, 창의적인 과학활동을 하기 위해서는 발산적 사고 이외에 다른 사고들도 중요한 역할을 한다고 지적되어 왔다. 이러한 논의에 기초하여 본 모델에서는 발산적 사고 이외에 수렴적 사고(convergent thinking)와 연관적 사고(associative thinking)를 과학적 창의성을 위한 사고유형으로 포함시키고, 이에 대한 근거를 논의할 것이다. 각 사고유형의 하위 특성을 제시하면 다음과 같다.

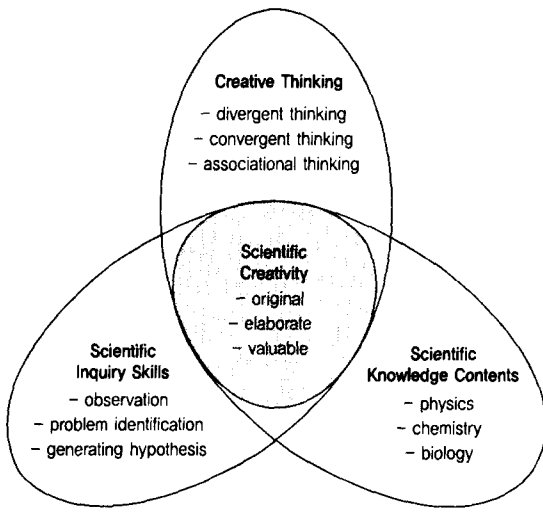


Fig. 1. Cognitive model of scientific creativity(CMSC)

- 발산적 사고 (divergent thinking) - 유창성, 융통성, 비판습적 사고
- 수렴적 사고 (convergent thinking) - 정합성, 통합성, 단순성
- 연관적 사고 (associational thinking) - 유사성 사고 (비유/은유/귀추), 비유사성 사고(결합/조합/연결)

1) 발산적 사고 (Divergent Thinking)

Guilford (1956, 1968)는 창의적 사고를 발산적 사고, 또는 확산적 사고로 정의하고, 얼마나 많이 (fluency; 유창성), 다양하고 (flexibility; 융통성), 독특하게 (originality; 독창성), 그리고 정교하게 (elaboration; 정교성) 사고하는가가 중요하다고 강조하였다. 예를 들어 와인잔의 용어를 생각해 보자. 먼저 와인잔에 포도주 이외에 물 등 다른 음식물을 담아 먹을 수 있을 것이다. 또 장식용으로 사용할 수도 있고, 물을 넣어 손가락으로 문질러 소리를 내면 악기로도 사용할 수 있을 것이다. 총을 쓰는 데 과녁으로 사용하거나, 스트레스 해소를 위해 깨뜨리는 용도로 사용할 수도 있고, 4개를 이용해 멋있는 받침대로 사용할 수도 있을 것이다. 여기에서 많은 용도를 (유창성), 다양하게(융통성), 남들이 미처 생각지 못한 용도를 (독창성), 가능하면 구체적이고 자세하게 진술(정교성)하는 것이 보다 창의적이라는 것이다. 이러한 발산적 사고는 실제 천재들의 활동량에서도 알 수 있다. 즉, 모차르트가 약 600여 편의 곡을 작곡했고, 토마스 에디슨이

1093개의 특허권을 딴 경우가 그러하다(Root-Berstein, 1999).

그러나, 활동량 자체가 중요한 창의적 발견과 상관있는 것은 아니라는 지적도 있다. 예를 들면, 창의적인 발견의 수와 그 사람이 발표한 논문 수 사이에 유의미한 상관관계가 없다는 지적이 그것이다(Root-Bernstein, 1999). 또, 창의적인 과학자들이 사용하는 실제 과정에서 유창성은 별로 중요하지 한다는 주장도 있다(Mansfield & Busse, 1981, p.104). 그러나, 여러 연구들에서 창의성과 발산적 사고와의 상관관계가 발견되어 온 것도 사실이다(Feldhusen & Clinkenbeard, 1986; Harrington *et al.*, 1983). 따라서 창의성에 대해 공통되고 널리 받아들여지고 있는 범주가 정확히 주어지지 않았다는 측면에서, 발산적 사고 검사는 창의적 사고에 대한 잠재력을 어렵한 것 뿐이라고 볼 수 있다(Runco, 1999). 이런 측면에서 본 연구에서는 발산적 사고가 곧 창의적 사고라는 관점보다는, 발산적 사고는 과학적 창의성을 위해 필요한 중요한 몇 가지 사고유형 중 하나라는 관점을 취하고자 한다. 즉, 본 모델에서는 과학적 창의성을 위한 사고에 발산적 사고 뿐 아니라, 수렴적 사고와 연관적 사고도 포함시켰다(수렴적 사고와 연관적 사고에 대한 자세한 논의는 뒤에서 다루겠다).

그렇다면, 독창성과 정교성은 단지 발산적 사고에만 필요한 요소라기 보다는 과학적 창의성을 위한 모든 사고와 활동에 공통적으로 필요한 요소로 볼 수 있다. 따라서, 본 모델(Fig. 1)에서는 발산적 사고의 하위 요소에는 유창성과 융통성만을 남기고, 독창성과 정교성은 과학적 창의성 전체에 포함되는 공통 요소로 나타내었다. 특히, 정교화는 과학 활동에서도 새로운 생각이나 법칙, 현상을 발견한 후에 과학자 사회로부터 동의를 얻기 위한 과정에서 중요하게 역할하는 것으로 강조되곤 한다(Mansfield & Busse, 1981, p.98).

이러한 과학적 창의성 전체에 포함되는 또 하나의 요소로 "가치(value)"를 들 수 있다. 즉, 사고나 활동 또는 그 결과물이 유용하고 가치로우며 해결해야 할 문제를 해결해 줄 수 있을 때 (Mansfield & Busse, 1981; Engle, *et al.*, 1997), 우리는 진정으로 창의적이라고 할 수 있다는 것이다. 예를 들면, 파피를 목적으로 개발한 독창적인 무기는 창의적 활동으로 보고 싶지 않다는 관점이다. 이러한 측면에서 최근의 여러 학자들은 단순한 창의성보다는 '적절하고 효율적인 창의성'을 강조하기도 한다(Cropley,

1999). 따라서, Fig. 1에서는 '독창성', '정교성', 그리고 '가치'를 과학적 창의성에 공통적으로 필요한 요소로 표현하였다.

비관습적 사고 (unusual thinking)

본 모델의 발산적 사고에는 Guilford가 제시했던 요소(유창성과 융통성) 이외에 비관습적 사고(unusual thinking)를 추가로 포함시켰다. 즉, 이제까지의 사고방식이나 개념, 인식을 달리해서 새롭게 생각하고, 새롭게 해석하는 것도 창의성의 중요한 한 측면이며 이것을 발산적 사고의 한 요소로 보고자 하는 것이다. 이러한 비관습적 사고를 통해 이제까지의 우리의 경험이나 인지적 또는 개념적 위상 속에 포함되어 있지 않은 새로운 것을 창안할 수 있기 때문이다. Millar(2000)도 상식적이고 직관적인 관점으로부터 벗어날 때 새로운 과학적 발견과 발전으로 연결되었음을 강조하였다. Jackosn과 Messnick (1967)은 이러한 측면을 변형이라고 표현하였다.

"어떤 대상은 전통적인 방식을 무시하고 새로운 관점을 갖게 하는 방식으로 요소들을 결합한다. 그것은 우리로 하여금 실재들을 새로운 방식으로 볼 수 있게 한다. 이러한 결과물에는 기존의 제한을 극복하도록 하는 사물이나 사고의 변형이 포함되어 있다."(Bransfield & Busse, 1981 p.5 에서 인용)

일상적 상황에서 비관습적 사고의 예를 들면 다음과 같다. 우리는 원을 그리고 연필로 원안을 까맣게 채워 넣으라고 하면, 대부분 Fig. 2와 같이 그린다. 그러나, Fig. 3도 원안을 까맣게 채워 넣은 그림이 될 수 있다(김영채, 2001, p. 96).

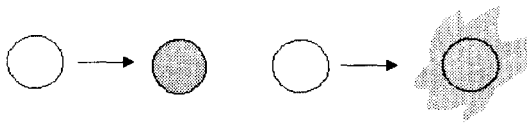


Fig. 2.

Fig. 3.

과학사적으로, 케플러가 천체의 운동이 원형이라는 기존의 믿음을 깨고 처음으로 행성의 궤도를 타원형이라고 생각하게 되었을 때, 또 아인슈타인이 시간의 흐름은 관찰자에 따라 다를 수 있으며 중력장에서 공간이 휘었다는 새로운 해석을 내리게 된 경우 등도 바로 전형적인 사고

틀에서 이탈한 비관습적 사고의 예라고 하겠다. 또, 물리학자 디랙(Dirac)이 음의 에너지를 가지고 시간이 흐르는 방향으로 운동하는 반입자의 운동을 파인만(Feynman)이 시간의 반대방향으로 운동하는 양의 에너지를 가지는 것으로 새롭게 해석한 경우도 그러하다(Rebaglia, 1999). 즉, 시간의 방향과 반대방향으로 간다는, 기존의 습관적 해석을 뒤엎은 새로운 해석이 창의적으로 도입된 것이다. 사실 이러한 비관습적 사고는 매우 어려운 사고라는 것을 알 수 있다. 예를 들면, 케플러가 행성의 궤도에 대한 기존의 관습적 사고를 깨고 원형궤도로부터 벗어나는 것이 얼마나 어려웠는지는 발견의 과정을 연구한 과학철학자 Hanson(1961)의 분석에서 엿볼 수 있다.

"궤도가 원형이고 나의 추론이 올바르다고 가정한다면... (그러나) 나의 추론은 잘못되었다. ... 계속적으로 원형 궤도에 의해 주어진 결과들이 티코의 관찰결과와 일치하지 않게 되자 비로소 케플러는 체계적으로 원형궤도의 가설을 의심하기 시작했다. ... 처음에 케플러는 직접적으로 달갈형 곡선의 구적을 찾으려는 헛된 시도들을 했다. ... 달갈형의 곡선에 대한 방정식을 찾는 것은 여전히 불가능했다. ... 관찰된 거리들은 새로운 달갈형의 궤도를 필요로 했으며 ... 이제 케플러는 거의 자신감을 잃은 채 타원으로 되돌아왔다." (pp. 76-82)

비관습적 사고는 Guilford가 언급했던 융통성이나 독창성과 공통되는 부분이 있다. 즉, 비관습적 사고라면 융통성이 높다는 것이고 독창적인 경우라고 볼 수 있다는 것이다. 또는 융통성과 독창성을 보다 넓게 정의하면 비관습적 사고도 융통성이나 독창성에 포함시킬 수 있을 것이다.

그러나 본 모델에서는 융통성과 독창성에서 일반적으로 강조하는 측면과 좀 다른 측면을 강조하기 위해 비관습적 사고를 추가로 포함시켰다. 즉, 일반적으로 융통성에서는 얼마나 유연하게 다른 범주의 사고를 많이 했는가를 주로 강조하고, 독창성에서는 얼마나 먼저 한 것이고 새로운 것(novel)인가를 많이 강조한다면, 비관습적 사고는 그 사고가 얼마나 기존의 관점과 다른가를 강조하기 위한 것이다. 좀 더 구체적인 예를 들어보자. $v = \frac{dx}{dt}$ (또는 $F = kx$)로 받아들여지고 있는 속도개념(또는 후크의 법칙)을 $v = \frac{dt}{dx}$ (또는 $F = k\sqrt{x}$)로 생각해 본다면, 그 사고는 처음으로 제안하는 새로운(novel) 사고이거나¹⁾ 그렇게도 생각해 볼 수 있다는 유연적인 사고(flexibility)의 측면보다는²⁾,

남들이 받아들이고 옳다고 생각한 방식과는 다르게 (unusual) 사고해 보려는 측면이라고 볼 수 있다. 실제로 창의적인 과학자들은 자신의 생각을 되돌아보거나, 기본 전제를 반대하거나 의심해 보거나, 모든 사람이 받아들이는 원리들에 대해서 “만일, ... 이라면”식의 사고게임 (mental game)을 즐긴다고 지적된 바 있고(Root-Bernstein, 1999), Bansfield & Busse (1981)도 창의적인 과학자가 사용하는 5가지 과정 중에 ‘기본 제한 조건의 변화(changing constraints)’를 포함시켰는데, 본 모델에서는 이러한 측면을 좀더 강조하기 위해 발산적 사고의 하위요소로 비관습적 사고를 추가시킨 것이다.

2) 수렴적 사고 (Convergent Thinking)

“창의적 과정에 대한 대부분의 현대적 모델들은 매우 다른 과정들 (예를 들면, 비판적인, 그리고 수렴적인 과정)의 역할을 인지하고 있다. ... 이제, 창의적 활동들은 종종 발산적 사고뿐 아니라 비판적이고 수렴적인 사고도 필요로 한다.”(Runco, 1999, p. 449-450).

과학적 창의성을 위해서는 확산적 사고뿐 아니라 수렴적 통찰(convergent insight)도 중요한 것으로 지적되고 있다. 즉, 과학활동에서는 산발적인 자료들을 수렴적으로 통합하여 하나의 전체적인 형태나 구조로 만들어 내는 일도 중요한 활동이고, 이 경우에도 창의성이 필요하다는 것이다. 이러한 전체적인 구조로 통합할 때 그 구조가 얼마나 정합적이고(coherency), 통합적이며(synthesis), 단순한지(simplicity)가 중요하다.

여기에서 정합성이란, 구성물 (예를 들면, 개념이나 지식)들이 논리적이고 합리적이며 일관성있게 연결되어 모순이 없음을 의미한다. 이것은 상황에 따라 설명방식이나 사고방식이 달라지지 않고, 하나의 규칙이나 원리로 묶일 수 있는 것을 말하기도 한다. Thagard(1997)는 비정합성을 인식할 때, 즉 정합성을 추구하고자 할 때 새로운 문제를 인식하게 되어 창의적인 발견으로 발전되는 경우가 많다고 지적하였다. 예를 들어, 아인슈타인은 16세에 빛과

같은 속력으로 달리면 빛이 어떻게 보일 것인지를 스스로 질문해 보면서, 내재된 모순을 인식하였는데⁴⁾ 그러한 인식이 상대성 이론으로 발전된 것이다(Wolpert, 1992). 이외에 부정합성의 인식이 새로운 과학적 발견으로 이끌어지는 예는 많이 찾아볼 수 있다(예를 들면, Kuhn, 1977; Millar, 2000)

통합성이란, 구조를 이루고 있는 구성물들의 수가 얼마나 많은가를 의미한다. 전기와 자기가 얽매어 법칙으로 통합되고, 가우스 법칙과 암페어 법칙, 그리고 패러데이 법칙이 막스웰 방정식으로 통합되어 전자기파 이론을 낳고, 전자기파의 속도가 빛의 속도와 같다는 발견을 통해 전자기파와 빛이 통합되고, 나아가 빛과 같은 파동이 입자와 통합되면서 전체 구조의 통합성이 증가하게 된다.

마지막으로 단순성이란, 하나의 커다란 구조로 묶이면서도 그 구조 속에 질서가 내재되어 있어 복잡하지 않음을 의미한다. 천동설이 코페르니쿠스에 의해 지동설로 바뀔 때, 중요한 계기 중의 하나는 태양과 지구를 포함한 천체의 운동을 설명하는데 천동설보다 지동설이 더 단순하다는 것이었다(Chalmers, 1978). 과학자들은 자연현상으로부터 얻은 자료들을 기호와 수식 등을 통해 그래프로 나타내거나 하나의 공식으로 만들어 가는 활동을 하는데, 이러한 과정에는 단순성을 추구하려는 측면이 포함되어 있다. Zuckerman (Basfield & Busse, 1981, p.57에서 인용)은 노벨상 수상자들과의 면담을 통해, 과학자들의 기호(taste) 중의 하나가 구하고자 하는 해(soution)의 단순성 추구라는 것을 발견하였고, 실제로 여러 과학자들도 창의적인 과학활동에서 아름다움과 단순성이 중요하다고 강조하고 있다.

단순성 추구는 산발적인 자료를 통합하는 과정에도 포함되지만, 산발적인 자료들로부터 중요한 요인과 그렇지 않은 요인을 구분하여, 중요한 요인들만의 관계를 추출해 내는 과정에도 포함된다. 예를 들면, 이상조건을 통해 자연현상을 단순화시켜 핵심적인 요인들의 영향이나 그들간의 관계를 탐색하는 경우가 그렇다(Song et al., 2001).

수렴적 통합을 돕기 위한 활동으로는 노박(Novak & Gowin, 1984)의 개념도(concept map)가 도움을 줄 수 있

1) 예를 들면, 속도개념을 처음으로 정의한 경우라면 독창적인 사고의 대표적인 예가 될 것이다.
2) 벽돌의 경우라면 그 용도를 다양하게 생각할 수 있다.
3) Bansfield & Busse는 ‘기본 제한 조건(constraint)’의 한 예로 ‘이론적 제한 조건’을 들었고, 이것은 Kuhn의 패러다임과 비슷하다고 하였다. 예를 들면, “만일 에너지가 보존되지 않는다면?”과 같이 과학자들이 일반적으로 널리 받아들이고 있는 기본 원리나 가정을 변화시켜 보는 것을 의미한다.
4) 갈릴레오 상대론에 의하면 빛과 같은 속력으로 달리면서 빛을 보면 정지된 빛을 보게 된다. 그러나 정지된 빛이란, 정지된 전기장과 정지된 자기장을 의미하는데, 이것은 전자기파에 대한 해석과 모순된다.

다. 개념도에서 특별히 중요한 것은 연결어인데, 그 이유는 연결어를 통해 여러 개념들이 서로 어떻게 연결되는지가 명확해지기 때문이다(Fig. 4).

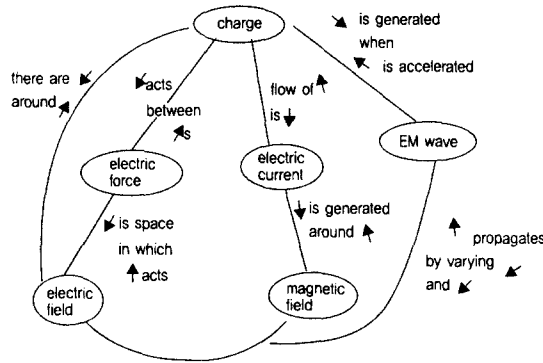


Fig. 4. Concept map

앞서 언급한 발산적 사고와 지금 논의한 수렴적 사고는 비단 과학적 창의성에서만 중요한 것이 아니라, 학생들의 개념 발달과정에서도 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있다. 오슈벨(Ausubel)은 개념적 발달과정에서 점진적 분화(progressive differentiation)와 통합적 화합(integrative reconciliation)이 중요한 역할을 한다고 지적한 바 있다. 이때, 점진적 분화는 개념체계가 점차로 영역을 넓혀가고 확장해 나간다는 측면에서 발산적 사고와 관련이 있고, 통합적 화합은 개념들간의 연결과 통합이 이루어진다는 측면에서 수렴적 사고와 관련이 있다고 하겠다.

3) 연관적 사고 (Associative Thinking)

창의성이란 반드시 무(無)에서 유(有)를 창출해 내는 것만을 의미하는 것은 아니다. 기존의 지식으로부터도 새로운 지식을 창안할 수 있다. 이때 연관적 사고가 이때 중요한 역할을 하게 된다.

연관적 사고란, 처음에는 별개로 보이던 두 개의 사건(기존의 사건과 새로운 사건)을 서로 연관시켜 기존의 사건에서 알려진 법칙과 설명, 특징을 새로운 사건에 도입하는 것을 말한다. 그럼으로써 새로운 사건을 설명하고 이해할 수 있게 되며 새로운 사건에서 새로운 특징을 발견할 수 있게 해 준다 (Root-Bernstein, 1999). 예를 들어, Rothenberg(1996)는 새로운 창의적 발견의 핵심은 겉보기에 연결되지 않은, 또는 상반되어 보이는 개념들을 서로 연결짓는 것이라고 하고, 이러한 연관을 통한 창의

적 과학활동 과정을 야누스적 과정 (Janusian Process)이라고 지칭하였다 그리고 구체적인 사례로 보어의 상보성 원리, 플랑크의 복사공식 등의 발견을 제시하였다. Gruber(1989)도 다윈과 피아제를 대상으로 한 연구를 통해, 서로 무관해 보이는 광범위한 현상들을 연구하여 그들간의 개념적 연결을 구축하는 것이 이들 과학자들의 중요한 특징이었다고 지적하였다.

연관적 사고에는 크게 유사성에 기초한 사고(similarity-based thinking)와 전혀 유사성이 없음에도 불구하고 연관짓는 비유사성 사고가 있다. 유사성에 기초한 사고에는 비유(analogy), 은유(metaphor), 귀추(abduction)가 포함되며(Park & Kim, 2002), 이러한 사고는 특히 과학에서 이론적인 측면의 창의성에 중요한 역할을 한다고 강조되어 왔다(Thagard, 1997). 예를 들면, Holyoak & Thagard (1999)는 비유의 기능으로 발견과 발전, 평가와 설명이 있는데, 이 중에서 새로운 과학적 가설의 발견에서 비유가 중요한 기능을 한다고 강조하였다. 그에 의하면, 다윈의 진화론과 인구수의 증가, 맥스웰의 전자기력과 연속적인 역학체계, 케쿨레의 벤젠과 뱀 등이 바로 비유적 사고에 의한 것으로 보았다.

Millar(1996)도 은유가 과학적 발견의 과정에서 중요한 사고라고 보았다. 그는 피아제의 동화와 조절 개념을 도입하여, 실세계로부터 정보와 자료가 들어와 기존의 지식이 비평형 상태에 이르면, 은유적 상호작용을 이용하여 기존의 지식이 조절되면서 새로운 지식이 생성된다고 보았다(Millar, 2000에서 예를 볼 수 있다).

귀추적 사고는 퍼스(Peirce, 1955)에 의해 알려진 개념으로, 이미 알려진 현상에서 잘 알려진 법칙을 새로운 현상을 설명하기 위해 도입해 오는 사고를 말한다(Park & Kim, 2002). 그의 생각은 다시 헨슨(Hanson, 1961)에 의해 소개되었는데, 그는 새로운 아이디어는 귀납과 연역으로부터 오는 것이 아니라, 바로 귀추로부터 오는 것이라고 주장하였다.

귀추적 사고의 예를 들어보면 다음과 같다(Lawson, 1995). 가젤은 치타와 같은 약탈자가 나타나면 즉시 도망가지 않고, 제자리에서 발을 짝짝 뺨으면서 뛰고 흰 엉덩이를 내보이는 이상한 행동을 한다고 한다. 이때, 우리는 왜 도망가지 않고 이상한 행동을 하는지 궁금해 할 것이다. 이때, 그러한 현상을 설명하기 위해, 다른 동물의 경우를 떠올릴 수 있을 것이다. 예를 들면, 동물들이 보이는 모성본능에 대한 사례를 떠올리면서 아마 가젤도 주변의

어린 가젤에게 위험을 알리기 위해 평소와 다른 이상한 행동을 하는 것이라는 가설을 제안할 수 있을 것이다. 이때, 다른 동물의 행동으로부터 알려진 설명방식을 가젤의 경우에 도입하는 사고가 바로 귀추적인 사고인 것이다.

Dunbar(1997)는 과학자의 실험실에서 과학자의 과학활동에 대한 수 개월에 걸친 관찰 연구를 통해, 과학자의 과학적 활동에서 3가지 특징을 관찰할 수 있었다고 보고하였다. 첫째는 과학자가 새로운 현상이나 예기치 못한 현상에 지대한 관심을 가진다는 것이었고, 둘째는 과학자가 대단히 많은 비유를 사용한다는 것이었다. 그리고 셋째는 토론과 논쟁을 즐긴다는 것이었다. 여기에서도 비유가 많이 사용되는 이유는 과학자들이 예기치 못한 새로운 현상에 접하게 되었을 때, 그 현상을 이해하고 설명하기 위해 새로운 설명이론을 제안할 때 비유를 사용하기 때문이라고 볼 수 있다.

연관적 사고를 통해 기존의 지식으로부터 새로운 지식을 창안해 내는 과정에서는 기존의 지식을 많이 가지고 있는 것이 중요하다. Weisberg(1986)는 창의적인 사람은 그렇지 못한 사람에 비해, 전문지식을 많이 가지고 있다고 지적한 바 있다. Mansfield와 Busse(1981)는 과학자들의 오랜 기간에 걸친 집중적인 노력이 문제해결에 중요한 단서, 특히 이전에는 연관되어 있다고 생각하지 못했던 그러한 단서들을 찾는데 도움을 준다고 하였다(Mansfield & Busse, 1981, p. 89). 여기에서도 한 분야에서의 오랜 기간에 걸친 집중적인 노력이 배경지식이 풍부해지고 심화되어가는 과정을 볼 수 있고, 그것이 곧 연관적 사고에 도움을 주게 되는 것으로 볼 수 있다. 또 과학을 배우는 학생들이 불일치 자료에 직면하여 자신의 선행개념을 버리고 새로운 개념으로 변화하는 과정에 대한 연구에서도 (Park et al., 2001; Park & Kim, 2002), 새로운 과학적 가설의 제안을 위해 배경지식이 중요한 역할을 한다는 것을 관찰한 바 있다.

그러나, 배경지식의 역할에는 부정적인 측면도 있다. 즉, 전문적 배경 지식이 오히려 사고의 범위를 좁히고 사고를 관습적으로 제한할 수도 있다는 것이다(Cropely, 1999). 그래서 창의성이 발현되기 위해서는 종종 초보자적인 태도를 가지고 신선함과 개방성을 가질 수 있어야 한다는 것이다. 흔히 이를 가리켜 '초보효과(novice effect)' 라고도 한다(Cropely, 1999). Root-Bersntein(1999)은 실제로 많은 과학자들이 초보자 상태에서 주요한 발견을 했었으며, 주요 연구기관이나 대학보다는 오히려

덜 알려진 대학과 기관에서 주요한 발견들이 많이 이루어졌다고 지적하고 있다.

연관성 사고는 반드시 두 사건들간의 유사성에만 기초하는 것은 아니다. 즉 전혀 서로 별개라고 생각되는 두 개를 서로 연결(connection)시키거나, 조합(combination)시키는 것도 포함한다. 이러한 새로운 연관을 통해서도 새로운 것이 창출될 수 있기 때문이다. 예를 들면, 시계와 라디오의 조합, 손목과 시계를 연결시켜 만든 손목시계, 자동차와 스테레오, 집과 자동차(모빌 하우스), 모터와 자전거(오토바이), 물고기와 소세지(어묵), 전화와 TV (비디오폰) 등의 조합이 그러하다.

2. 과학지식 내용(Scientific Knowledge Contents)

특정 영역에서의 지식내용은 창의적 활동에 필수적인 요소이다(Walberg and Stariha, 1992; Feldhusen, 1995). 즉, 앞서 논의한 3가지 사고가 구체적인 과학지식 내용(scientific knowledge contents)과 연계될 때, 과학적 창의성이 발현될 수 있다는 것이다.

"사고 자체만으로는 창의적 우월성으로 이끌 수 없다. 왜냐하면, 창의성은 아무런 내용이 없는 곳 (vacuum) 에서 발현되는 것이 아니라 특정한 영역 내에서 발현되는 것이기 때문이다." (Cropley and Urban, 2000, p. 487)

과학적 창의성을 위한 사고와 과학지식 내용이 조합된 경우를 예를 들어 보면 다음과 같다: 파인만의 반입자는 반입자(과학지식내용)에 대해 비판습적 사고(발산적 사고)를 한 경우이며, 막스웰의 방정식은 전자기적 법칙들(과학지식내용)을 통합하는 과정에서 정합성을 요구하면서(수렴적 사고) 얻어진 것이라고 하겠다. 마찬가지로, 아인슈타인이 16세 때에 생각했던 빛의 속력으로 달리는 문제에 대한 인식도 갈릴레이 상대론과 전자기파(과학지식내용)간에 정합성을 추구하려는 과정(수렴적 사고)에서 나타난 것이고, 페르미가 원자내 전자의 에너지 천이를 통해 빛을 방출하는 과정을 베타붕괴를 설명하기 위해 비유적으로 적용한 경우(Miller, 2000, pp.242-245)도 원자내 전자 천이와 베타붕괴(과학지식내용)를 창의적으로 연결시킨 사고(연관적 사고)에 의한 것이라고 하겠다.

3. 과학적 탐구 기능 (Scientific Inquiry Skills)

과학적 창의성은 구체적인 과학탐구활동에서 발현되기 마련이다. 따라서, 과학적 창의성 모델은 과학적 탐구과정과 융합되어야 한다. 즉, 과학적 창의성 모델 속에는 과학탐구기능(scientific inquiry skills)이 포함되어야 한다.

과학적 탐구과정을 하나의 모형으로 나타내는 것이 매우 어려운 일이며 또 가능하지 않을 수도 있다. 그러나, 과학의 과정을 이해하기 위해, 그리고 교육학적 관점에서 탐구의 과정을 지도하기 위해 하나의 모델이 필요한 것도 사실이다. 본 논문에서는 과학활동의 유형을 크게 다음 3가지로 요약하였으며, 이를 Fig. 5와 같이 도해적으로 나타내었다.

- 자연현상에 대한 관찰을 통해 가설이 제안되면 실험적 검증을 통해 과학이론으로 만들어지는 과정
- 관찰을 통해 특정 사실이나 규칙성을 찾아내거나 일반화된 법칙을 제안하는 과정
- 과학이론과 법칙을 이용하여 자연현상이나 또 다른 이론과 법칙을 설명하거나 예측하는 과정, 그리고 과학법칙들을 여러 상황에 적용하거나, 새로운 것을 개발하는 과정, 그리고 의미론적으로 재해석하고 형식화된 형태로 구조화하는 과정

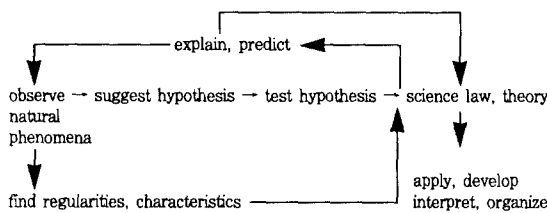


Fig. 5. Process of scientific inquiry

Fig. 5에서 가설을 통해 과학이론을 구축해 나가는 과정은 다시 가설 제안과정과 가설검증과정으로 세분화될 수 있다. 이때, 가설의 제안과정은 다음과 같은 4단계로 세분화될 수 있고: 관찰 → (인과적) 질문 제기 → 가설의 탐색 → 가설의 제안(박종원, 2000, 2001; Park & Kim, 2002), 가설의 검증과정은 다시 2단계로 세분화될 수 있다: 가설로부터의 실험적 예측과 실제 실험을 통한 실험적 예측의 검증(박종원, 1998). 그리고 실제 실험을 통한

실험적 예측의 검증과정은 다시 다음 과정으로 요약될 수 있다: 실험 설계 → 실험수행 → 결과분석 → 가설의 평가(Fig. 6). 이러한 과정을 통해 실험결과가 가설을 지지하는 것으로 나타나면 가설이 과학적 법칙과 이론의 지위를 획득하게 되지만, 실험결과가 가설을 반증하는 것으로 나타나면 가설을 폐기되고 새로운 가설을 탐색하고 새로운 가설을 제안하게 될 것이다(Park et al., 2001).

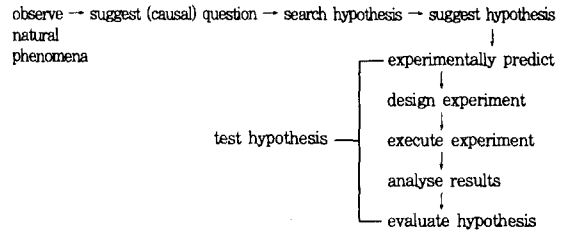


Fig. 6. Process of suggesting and testing hypothesis

과학 법칙과 이론이 제안되면 이를 통해 관찰된 자연현상뿐 아니라, 다른 이론이나 법칙을 설명하거나 예측하기도 한다(박종원, 1998). 이러한 과학적 설명(또는 예측)의 과정은 논리적인 과정이므로, 연역적 사고가 중요한 역할을 한다 (Park & Han, 2002). 또 과학 법칙이 형성되면, 과학자는 그에 대한 의미론적 해석을 하게 된다. 예를 들면, 플랑크가 복사 현상을 설명하기 위해 빛 에너지가 양자화되었다고 가정 한 후에도 플랑크뿐 아니라, 아인슈타인이나 슈뢰딩거, 하이젠버그 등이 그에 대한 의미론적 해석을 계속했던 사례가 그렇다(Langley, et al., 1987; 박종원, 2002). 그리고 법칙들을 낱개의 개별적 조각들로 놔두기보다는 서로 통합적으로 연결시켜 구조화시키는 것도 중요한 과학적 탐구활동 중의 하나이다. 이제 과학적 탐구과정과 각 과정에서의 탐구기능들을 전체적으로 다시 나타내면 Fig. 7과 같다.

4. 과학적 창의성 활동과 반응 예시

본 연구에서의 과학적 창의성 모델에 의하면, 과학적 창의성 활동은 과학적 탐구기능과 과학지식내용과 창의성 활동을 위한 사고가 함께 융합될 때 일어나는 것으로 볼 수 있다.

예를 들어 Fig. 8와 같은 활동을 보자. 이 활동에서 어떤 학생들은 “전류와 전압은 무슨 관계일까?”라고 질문을

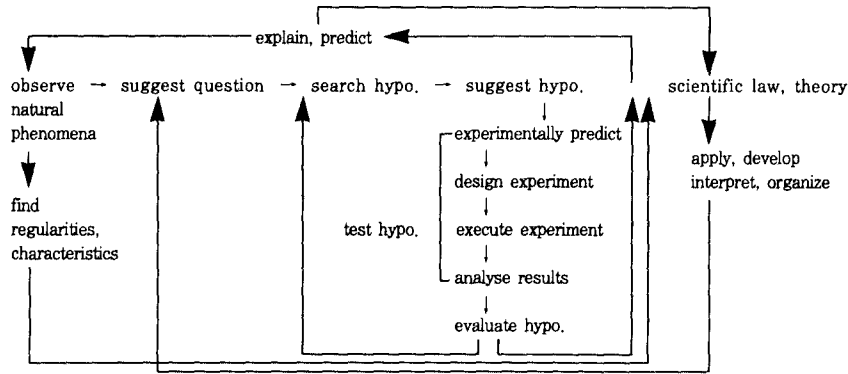


Fig. 7. Process of scientific inquiry and inquiry skills

Title: Lightness of Electric Bulb

Scientific Knowledge Contents : voltage, electric current, resistance, Ohm's law, electric energy

Scientific Inquiry Skill : Suggesting (causal) questions

Thinking for Scientific Creativity : Divergent thinking, Convergent Thinking, Elaboration, Originality

Following data indicate the measured electric current and the brightness of an electric bulb by the increasing voltage.

Voltage (V)	Electric Current (A)	Brightness of a electric Bulb (Lux)
1.5	0.198	45
2	0.232	170
3	0.283	752

From this result, suggest various questions (problems) valuable to be inquired, as many and precisely as possible. And you should give rationale or reasons for the suggested questions (problems).

Fig. 8. Example of learning activity for scientific creativity

제기하였다면, 전압과 전류 개념을 이용하여 (과학지식내용), 질문을 제기했다는(과학적 탐구기능) 측면에서 과학적 창의성의 2개 요소는 포함하고 있다. 그러나, 창의성을 위한 사고가 포함되어 있지 않으므로, 과학적 창의성 활동을 하였다고 보기 어렵다.

만일, 측정자료에서 "옴의 법칙에 의하면 전류가 전압에 비례하는데, 여기에서는 왜 전압이 2배가 되어도 전류가 2배가 되지 않지?"라고 하였다면, 이론과 실험결과와의 정합성을 요구하는 사고(수렴적 사고)를 사용한 것이므로, 과학지식내용과 탐구기능, 그리고 창의성을 위한 사고가 융합되었다는 측면에서 과학적 창의성 활동이라고 할 수 있다. 나아가, "전압과 전류를 곱해서 전력을 보면, 전력이 약 3배가 되니까, 빛의 밝기는 약 16배나 증가하였

네? 전력이 공급된 에너지이고 빛의 밝기가 방출된 에너지라고 본다면, 어떻게 공급된 에너지가 3배 정도밖에 증가하지 않았는데, 방출된 에너지는 16배나 증가할 수 있지?"라고 하였다면, 이것도 정합성을 요구하는 사고(수렴적 사고)와 과학지식내용, 그리고 탐구기능이 융합된 과학적 창의성 활동을 한 것이다. 나아가, 이러한 질문이 다른 사람들이 미처 제기하지 못한 새로운 질문이라면 독창적이라고 할 수 있고, 이와 같은 가치로운 질문을 여러 가지 다양하게 제기할 수 있다면 발산적 사고가 작용한 것이라고 볼 수 있다. 물론, 질문이 세련되고 분명할수록 정교성이 증가하는 것이 되겠다.

물론, Fig. 8이 실제 학생을 위한 활동자료로 활용되기 위해서는 몇 가지 고려할 점들이 있다. 먼저, 과학지식내

용이나 과학적 탐구기능과 관련해서 사전에 필요한 학습 활동이 주어질 필요가 있을 것이다. 예를 들면, 전류, 전압, 저항 개념 이해를 위한 활동이나 옴의 법칙 실험 활동 등이 그것이다. 둘째, 학생의 수준이나 학생의 흥미를 고려할 필요가 있다. 셋째로, 과학적 창의성 활동도 추상적이고 이론적인 내용뿐 아니라, 실제 자연이나 현상과 연관지어질 필요가 있을 것이다. 이 외에도 실제 학생들에게 과학적 창의성 활동이 적용되기 위해서는 고려해야 할 조건들이 더 있을 것이다. 이에 대한 구체적인 논의는 다음 논문에서 다루고자 한다.

Ⅲ. 결론 및 후속연구

본 논문에서는 먼저, 과학적 창의성 활동을 위한 3가지 사고 - 발산적 사고, 수렴적 사고, 상관적 사고 - 를 정의하고 그에 대한 근거와 특징을 논의하였다. 여기에서, 발산적 사고는 유창성, 융통성, 비판습적 사고를 주요 특징으로, 수렴적 사고는 정합성, 통합성, 단순성을 필요로 하는 것으로, 그리고 상관적 사고에는 유사성 기초 사고(비유/은유/귀추)와 유사성에 기초하지 않은 사고로 정의하였다.

그리고, 이러한 과학적 창의성 모델에서 독창성, 정교성, 그리고 가치를 공통 요소로 포함시켰다.

마지막으로, 과학적 창의성을 위한 사고와 과학지식 내용, 그리고 과학적 탐구기능이 융합된 과학적 창의성 활동의 한 예시를 제시하였다.

본 연구는 실제적인 과학적 창의성 활동을 개발하기 위한 이론적 기초로 수행된 것이다. 후속 연구에서 제안된 과학적 창의성 모델에 기초하여, 학생들의 과학적 창의성 신장을 위한 구체적인 활동자료가 개발될 것이다. 좀 더 구체적으로 소개하면, 본 논문의 과학적 창의성 모델에 기초하여 세부 활동 유형이 8개 - (1) 숨겨진 규칙성/특징 찾기, (2) 불일치 인식하기, (3) 새로운 실험방법 고안/개선하기, (4) 새로운/다른 방식으로 설명하기, (5) 개념의 통합/비교/구체화/변형/확장하기, (6) 다양하게/새로운 방식으로 정교하게 표현하기, (7) 이론과 현상 연결짓기, (8) 비일상적 상황에서 또는 기본가정/조건 바꾸어 예상해 보기 - 로 분류되어 개발되고 있다. 물론, 제안된 8개 유형은 계속 수정 보완될 것이며, 구체적인 활동 유형과 활동별 특징은 다음 논문에서 다루어질 것이다.

국 문 요 약

과학적 창의성은 창의적 사고만으로 발현될 수 없으며, 과학지식내용과 과학적 탐구기능이 함께 사용되게 마련이다. 따라서, 본 연구에서는 과학적 창의성을 위한 사고, 과학지식내용, 과학적 탐구기능의 3 요소로 구성된 인지적 측면에서의 과학적 창의성 모델을 제안하였다. 그리고 모델의 공통요소로 가치, 독창성, 정교성을 포함시켰다. 최근에는 발산적 사고가 곧 창의적 사고라고 보기보다는, 과학적 창의성에 여러 가지 다양한 사고가 필요하다고 강조해왔다. 본 연구에서는 이러한 논의들에 기초하여, 과학적 창의성을 위한 사고로 발산적 사고, 수렴적 사고, 그리고 연관적 사고를 제안하였다. 인지적 측면의 과학적 창의성 모델에 기초하여 구체적인 과학적 창의성 활동 예시를 제시하고, 어떻게 활동자료가 개발될 수 있는지에 대한 제언을 하였다. 앞으로 연구에서는 구체적으로 다양한 과학적 창의성 활동유형을 정의하고, 유형별 학습지도자료를 개발하게 될 것이다.

참 고 문 헌

- 교육부(1997). 고등학교 교육과정 (I): 교육부 고시 제 1997-15호 (p. 334). 서울: 대한교과서 주식회사.
- 김영채(2001). 창의적 문제해결: 창의력의 이론, 개발과 수업. 교육과학사.
- 박종원(1998). 과학활동에서 연역적 사고의 역할. 한국과학교육학회지, 18(1), 1-17.
- 박종원(2000). 학생의 과학적 설명가설의 생성과정 분석 - 과학적 가설의 정의와 특성을 중심으로. 한국과학교육학회지, 20(4), 667-679.
- 박종원(2001). 학생의 과학적 설명가설의 생성과정 분석 - 대학생 반응 분석을 중심으로- 한국과학교육학회지 21(3), 609-621.
- 박종원(2002). 개념체계의 연속적 세련화와 정교화를 통한 개념 변화 분석 - 이론적 논의를 중심으로-. 한국과학교육학회지, 22(2), 357-377.
- 우종옥, 이경훈, 이항로(1994). 과학교육학 목표에 관한 연구. 한국과학교육학회지, 14(2), 159-169.
- Alexander, P. A.(1992). Domain knowledge: Evolving themes and emerging concerns. *Educational Psychology*, 27, 33-51.

- Baer, J.(1999). Domains of creativity. In M. A. Runco & S. R. Pritzker (Eds.) *Encyclopedia of Creativity* (pp. 591-596). London: Academic Press.
- Chalmers, A. F.(1978). *What is this thing called science?* Open University Press.
- Cropley, A. J.(1999). Definition of creativity. In M. A. Runco & S. R. Pritzker (Eds.) *Encyclopedia of Creativity* (pp. 511-524). London: Academic Press.
- Cropley, A. J., & Urban, K. K.(2000). Programs and strategies for nurturing creativity. In K. A. Heller, F. J. Monks, R. J. Sternberg, and R. F. Subotnik (Eds.) *International Handbook of Giftedness and Talent* (pp. 485-498). Oxford: Elsevier Science Ltd.
- Diakidoy I-A. N., & Constantinou, C. P.(2001). Creativity in physics: Response fluency and task specificity.
- Dunbar, K.(1997). How scientists think: On-line creativity and conceptual change in science. In T. B Ward, S. M. Smith and J. Vaid (eds) *Creative Thought: An Investigation of Conceptual Structures and Processes* (Washington, D. C.: American Psychological Association), 461-494.
- Feldhusen, J. F.(1995). Creativity: a knowledge base, metacognitive skills, and personality factors. *Journal of Creative Behavior*, 29, 255-268.
- Feldhusen, J. F., & Clinkenbeard, P. R.(1986). creativity instructional materials: A review of research. *Journal of Creative Behavior*, 20, 153-182.
- Gardner, H.(1983). *Frames of Mind: The Theory of Multiple Intelligence*. New York: Basic Books.
- Gruber, H. E.(1989). Networks of enterprise in scientific creativity. In B. Gholsen, W. R. Shadish, Jr., R. A. Neimeyer, & A.C. Houts. (Eds.) *Psychology of Science: Contributions to metascience* (pp.246-265). Cambridge: Cambridge University Press.
- Guilford, J. P.(1956). The structure of intellect. *Psychological Bulletin*, 53, 267-293.
- Guilford, J. P.(1968). *Intelligence, creativity, and their educational implications*. San Diego, CA: EDITS.
- Hanson, N. R.(1961). *Patterns of Discovery: An Inquiry into the Conceptual Foundations of Science* (Cambridge: Cambridge University Press).
- Harrington, D. M., Block, J., & Block, J. H.(1983). Predicting creativity in preadolescence from divergent thinking in early childhood. *Journal of Personality and Social Psychology*, 45, 609-623.
- Hu, W., & Adey, P.(2002). A scientific creativity test for secondary school students. *International Journal of Science Education*, 24(4), 389-403.
- Holyoak, K. J. & Thagard, P.(1999). *Mental Leaps: Analogy in Creative Thought* (London: The MIT Press).
- Engle, D. E., Mah, J. J., & Sadri, G.(1997). An empirical comparison of entrepreneurs and employees: Implications for innovation. *Creativity Research Journal*, 10, 45-49.
- Jackson, P. W., & Messnick, S.(1967). The person, the product, and the response: Conceptual problems in the assessment of creativity. In J. Kagan (ed.), *Creativity and Learning* (pp. 1-19). Boston: Houghton Mifflin.
- Kuhn, T. S.(1977). *The structure of scientific revolutions*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Langley, P., Simon, H. A, Bradshaw, G. L., & Zytkow, J. M.(1987). *Scientific Discovery: Computational explorations of the creative processes*. London: The MIT Press.
- Lawson, A. E.(1995). *Science Teaching and Development of Thinking* (Belmont, CA: Wadsworth Publishing Company).
- Maier, N. R. F.(1931). Reasoning in humans: II. The solution of a problems and its appearance in consciousness. *Journal of Comparative Psychology*, 12, 181-194.
- Mansfield, R. S., & Busse, T. V.(1981). *The psychology of creativity: scientists and their work*. Chicago: Nelson-Hall.

- McComark, A. J., & Yager, R. E.(1989). A new taxonomy of science education, *Science Teacher*, 56(2), 47-48.
- Miller, A. I.(1996). Metaphors in creative scientific thought. *Creativity Research Journal*, 9, 113-130.
- Millar, A. I.(2000). *Insights of Genius: Imagery and creativity in science and art*. London: The MIT Press.
- Novak, J. & Gowin, B.(1984). *Learning how to learn*. Cambridge University Press.
- Park, Jongwon & Kim, Ikgyun.(2002). *Analysis of the students' processes of generating scientific explanatory hypothesis*. Paper presented at the Annual Conference of Australasian Science Education Research Association, Cairns, Australia.
- Park, Jongwon, & Sooja, Han.(2002). Deductive reasoning to promote the change of concept about force and motion. *International Journal of Science Education*. 24(6), 593-610.
- Park, Jongwon, Kim, Ikgyun, Kim, Myungwhan, & Lee, Moo.(2001). Analysis of the students' processes of confirmation and falsification of the hypotheses in electrostatics. *International Journal of Science Education*. 23(12), 1219-1236.
- Peirce, C. S.(1955). Abduction and induction. In J. Buchler (ed.) *Philosophical Writings of Peirce* (New York: Dover Publications, INC), 150-156.
- Rebaglia, A.(1999). Scientific discovery: Between incommensurability of paradigms and historical continuity. *Foundations of Science*, 4, 337-354.
- Renzulli, J. S.(1978). What makes giftedness? reexamining a definition. *Phi Delta Kappan*, 59, 180-184.
- Rothenberg, A.(1996). The Janusian process in scientific creativity. *Creativity Research Journal*, 9(2,3), 207-231.
- Root-Bernstein, R.(1999). Discovery. In M. A. Runco & S. R. Pritzker (Eds.) *Encyclopedia of Creativity* (pp. 559-571). London: Academic Press.
- Runco, M. A.(1999). Divergent thinking. In M. A. Runco & S. R. Pritzker (Eds.) *Encyclopedia of Creativity* (pp. 577-682). London: Academic Press.
- Sternberg, R. J.(1996). *Successful Intelligence*. New York: Basic Books.
- Sternberg, R. J.(1999). *Handbook of Creativity*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Song, Jinwoong, Park, Jongwon, Kwon, Sunggi, & Chung, Byunghoon.(2001). Idealization in Physics: Its types, roles and implications to physics learning. In Pinto, R., & Surinach, S. (Eds.), *Physics Teacher Education Beyond 2000*. (pp. 359-366). Paris: Elsevier
- Thagard, P.(1997). Coherent and creative conceptual combinations. In T. B Ward, S. M. Smith and J. Vaid (Eds) *Creative Thought: An Investigation of Conceptual Structures and Processes* (Washington, D.C.: American Psychological Association), 129-141.
- Walberg, H. J., & Stariha, W. E.(1992). productive human capital: learning, creativity and eminence. *Creativity Research Journal*, 5, 323-341.
- Ward, T. B., Saunders, K. N., & Dodds, R. A.(1999). Creative cognition in gifted adolescents. *Roeper Review*, 21, 260-266.
- Weisberg, R. W.(1986). *Creativity: Genius and other myths*. New York: Freeman.
- Wolpert, L.(1992). *The Unnatural Nature of Science*. Cambridge: Harvard University Press.