

창의적 과학방법으로서 철학의 비판적 사고: 신경철학적 해명

박 제 윤*

단국대학교

The Critical Thinking of Philosophy as a Creative Method of Science: Neurophilosophical Explication

Park, Jeyoun*

DanKuk University

Abstract: This study is a proposal, which is the trial to explicate, in neurology, on how critical thinking as a creative method of sciences functions.

The creative methods of sciences, even at present, are mostly the hypothetical insistences concerning with the logical processes of researches suggested from the philosophers of science; Popper, Kuhn, Hempel, or Lakatos. These insistences do excavate what process or approach can be scoped out of scientists' creativity. I call the tendency or approach of the researches, "Process Approach of Creativity (PAC)." From my view point, any PAC trial does not concern with how creative theories can actually be invented.

On the other hand, this study is focused on the philosophical thinking abilities of scientists who invented new great theories. They mostly had some experiences to study philosophy while studying their science fields, thus had critical thinking abilities on their studies. From my point of view, critical thinking in philosophy raised questions as to their fundamental and basic (old) concepts and principles, and thus gave them new creative theories. I will try to explain this from the point of neurophilosophy.

From the perspectives coming from "the state space theory of representation" of Paul & Patricia Churchland, the pioneers of neurophilosophy, the "creative theories" are the networks of topographic maps giving new comprehensive explanations and predictions. From these perspectives, I presuppose that the attitude of critical questioning revises the old networks of maps with back-propagation or feedback, and thus, is the generative power of searching new networks of maps. From the presupposition, I can say, it is important that scientists reflect on the basic premises in their academic branches for issuing out extraordinary creativity. The critical attitude of philosophy can make scientists construct the maps of new conceptual scheme by shaking the maps of the old basic premises. From this context, I am able to propose "Critical Thinking Approach of Creativity (CTAC)."

Key words: creativity, method of sciences, critical thinking, state space theory of representation, neurophilosophy

1. 서론: 창의성 과정 접근법

과학의 방법론(또는 발견법)은 전통적으로 과학철학의 중심 주제들 중에 하나이다(Chalmers, 1999; Feyerabend, 1993; Godfrey-Smith, 2003; Hanson, 1958; Jason, 1989; Kuhn, 1970; Nickles, 1980; Rose, 2001). 그리고 이 주제와 관련된 여러 논의들은 여러 분야의 과학 연구자들에게 매력적인 관심

거리가 되어왔다(Baer, 1998; Becker, 1995; Briskman, 1981; Steptoe, 1998; Sternberg, 1999; Weisberg, 1999a). 뿐만 아니라 유능한 미래의 공학자 및 과학자들을 양성하려는 과학교육자들에게 과학의 방법론이 교육과정에 필수적이라는 인식이(특히 과학 교육학회 내에) 있으며, 따라서 이공계 교육과정에 과학의 본성은 물론 방법론에 대한 교육이 필요하다는 일반적 인식이 있다(김현승, 2010; 백성혜, 2001; 이

*교신저자: 박제윤(jeyounp@naver.com)

**2012.11.19(접수) 2013.01.04(1심통과) 2013.01.07(최종통과)

***이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음.[NRF-2011-35C-A00168]

상원, 2007; 홍성욱, 2003; 홍성욱 외, 2004; Lawson 2001). 그러나 그러한 과학철학의 교육이 과학자들의 과학탐구에 실질적으로 어떻게 도움이 될 것인지 구체적 해명을 찾아보기는 어렵다. 그저 막연히 도움이 될 것이라는 기대만 있을 뿐이다. 본 연구는 그러한 기대, 즉 과학의 탐구에 철학적 연구가 도움이 된다는 것을 신경철학적 관점에서 해명하려 한다.

지금까지 창의적 과학연구 방법과 관련하여 발전된 논의들은 주로 포퍼(K. Popper), 쿤(T. Kuhn), 험펠(K. Hempel), 라카토슈(I. Lakatos) 등등의 과학철학자들이 제안한 주장들과 관련된다. 그 논의들은 대부분 특정한 과학의 논리적 '탐구과정'에 관한 가설적 주장들이다. 과학교육 연구자들은 특별히 어떤 과학 연구의 논리적 추론과정에 주목함으로써 어떠한 연구과정이 창의적 이론을 유도하게 할지에 관심을 갖는다(권용주 외, 2003; 백성혜 외, 2011; 백성혜 외, 2012; Lawson, 2001). 본 연구자는 그러한 과정 중심 혹은 절차중심의 탐구 태도 혹은 접근법을 창의성 과정 접근법(Process Approach of Creativity: PAC)¹⁾이라 부르겠다. 본 연구자의 관점에 따르면, PAC 연구들 중에 실질적으로 창의적 이론이 어떻게 제안되는지를 해명하려는 시도는 보이지 않는다.¹⁾ 지금까지 PAC로 창의적 연구방법을 모색해왔던 과학교육 연구자들은 "과학자들이 특정한 논리적 절차를 따르기만 하면 그것이 곧 창의적 이론을 탄생시켜줄 것이다."라고 가정하는 낙관적 관점을 갖는다. 다시 말해서, 그들은 과학자들이 일반적으로 수행하는 표준적 과정 또는 절차가 있으며, 그 과정 또는 절차를 따라가면 창의적 이론이 나타날 것이라고 막연히 기대한다. 그러한 기대를 갖는 창의성 과정 접근법(PAC)은 다음과 같은 두 가지 결정적 곤란을 갖는다.

첫째, 지금까지 과학철학자들의 논쟁을 통해 드러났듯이, 그 어느 논리적 추론 과정도 실제

과학자들의 창의적 이론 탐구 절차를 포괄적으로 설명하지 못한다.

과학사의 여러 창의적 성과의 사례들을 해명하는 여러 주장들, 즉 검증주의, 반증주의, 패러다임 교체, 연구프로그램 등을 주장하는 여러 가설들은 나름의 설득력을 보여주기도 하지만, 동시에 그 한계가 드러나기도 했다(Chalmers, 1999; Godfrey-Smith, 2003). 이러한 측면을 고려할 때, PAC의 어느 시도라도 실제 과학 활동을 포괄적으로 설명하는 이론이라고 인정되기 어렵다. 따라서 만약 그 중의 어느 이론이 과학의 창의적 방법으로 활용될 경우, 그 방법이 실제 창의적 이론의 탄생으로 이어질 것이라고 기대하기 어렵다. 적어도 지금까지 PAC에 의해 과학의 창의성을 성공적으로 설명한 가설은 없다.

둘째, 과학자들이 어떠한 연구 절차를 따르는 것과 창의적 이론을 제안하는 것은 서로 다른 문제이며, 서로 긴밀히 관련되어 있지도 않다.

과학자들이 연구 과정에서 관찰을 먼저 하고 이론적 가설을 제안하는 과정을 거치든, 혹은 가설적 제안을 먼저 하고 실제 검증 또는 반증의 사례를 찾는 과정으로 이루어지든, 아니면 기존의 이론체계 내에서 새로운 문제풀이 과정을 추진하든, 혹은 기존의 이론체계를 버리고 새로운 이론체계를 모색하고 난 이후에 문제풀이 과정을 추진하든, 그 어느 과정도 새로운 이론적 고안이 어떻게 창출되는지를 설명할 의도를 갖지는 못한다. 단지 특정의 연구 과정 또는 절차를 따르는 것만으로는 실제 과학탐구 활동 중에 창의적 가설이 어떻게 제안되는지 설명되기 어렵다. 이러한 의심의 배경에서 과학 방법론의 무정부주의, 즉 "아무렇게나 하자."는 제안도 있었을 것이다.²⁾

이렇게 창의적 과정 접근법(PAC)의 여러 시도들이

1) 백성혜 외(2012)의 지적에 따르면, 쿤은 새로운 패러다임이 어떻게 만들어지는지 명확히 밝히지 않았으며, 라카토슈는 어떻게 다양한 연구프로그램들이 생성되는지에 대해서는 중요하게 다루고 있지 않다. 이러한 이유로 그들은 로슨(Lawson, 2001)의 창의적 사고 과정에 관심을 갖는다. 로슨의 창의적 사고 과정은 "숙고"(Incubation) 단계와 순환적인 "검증"(verification) 단계로 이루어진다. 본 연구의 해석에 따르면, 그 순환적 "검증" 과정은 이미 제안된 가설에 대한 평가적 단계일 뿐이며, 포퍼가 제시했던 반증의 논리적 과정과 유사하다. 이것은 본 연구가 구분하는 비판적 사고의 CT1일 뿐이다. 본 연구자의 관점에 따르면, 로슨의 창의적 사고의 순환적 단계에서 창의적 아이디어가 발현되는 단계는 의식 이하 수준의 "숙고" 단계이다. 따라서 로슨은 창의성이 어떻게 발현되는지를 설명하려면, 바로 숙고 단계에 대한 구체적 해명이 있어야 했다. (조금 더 엄밀히 말해서 CT1이 어떻게 창의성을 유도하는지 설명이 있어야 했다. 한 마디로, 새로운 사고판, P2가 어떻게 도입되는지 설명이 필요하다.) 본 연구는 이것이 CT2에 의해 가능하다고 주장한다. 또한 이상욱(2010) 외, 그리고 다른 여러 논문과 저술들은 창의성을 위해 "발산적 사고"와 "수렴적 사고"가 필요하다고 제안한다. (이런 방안 역시 특정 과정을 제안한다는 측면에서 창의적 과정 접근법에 포함된다.) 그러나 그러한 제안 역시 "그 발산적 사고 자체가 어떻게 가능한 것인가?"의 질문에 대답하지 못함으로써, 순환논증의 고리에서 빠져나오지 못하여 앞으로 나아가지 못한다. 문제의 핵심은 발산적 사고 자체가 어떻게 가능한지를 설명해야 하는 일이다.

2) 페이어아벤트(Feyerabend, 1993)는 창의적 발견을 위해 그 어떤 제약도 두지 말자고 설득한다는 측면에서, 기본적으로 새로운 가설이 어떻게 제안되는지 해명할 수 없는 한계를 인식했다고 평가될 수 있다.

성공하기 어려웠던 이유는 다음과 같이 정리된다. PAC는 창의성의 원동력이 어디에서 기원하는지 관심을 기울이지 않는다. 따라서 그 접근법은 특정(주장되는) 절차를 따름에도 불구하고 오직 소수의 과학자들만이 창의적이며, 대부분은 그렇지 못한 이유를 설명하지 못한다.(Miller, 1996) 간단히 말해서 PAC는 창의적 이론이 어떻게 도출되는지 전혀 대답해줄 가능성이 없다. 본 연구자의 관점에 따르면, PAC를 따르는 지금까지 연구들은 “창의성”이 무엇인지에 대해(공허한) 사전적 정의를 넘어서는 실질적이고 구체적인 이해에 기초하였는지조차 의심된다.

2. 창의성 비판적 사고 접근법

본 연구자는 보통의 창의성(ordinary creativity)과 비범한 창의성(extraordinary creativity)을 구분하겠다(Andreasen, 2005). (물론 이 양자 사이에 엄격한 구분 기준을 설정하려는 입장은 아니다.) 그러한 구분에 기초하여 본 연구자는 서양에서(비범한) 새로운 이론을 창안했던 과학자들의 ‘철학적 사고 능력’에 관심을 갖는다.³⁾ 그러했던 과학자들 대부분은 과학 연구 이외에 철학을 공부한 경험이 있으며, 따라서 자신의 학문에 대해 철학적으로, 즉 비판적으로 사고할 줄 아는 과학자들이었다.(Fisher, 2001) 다시 말해서 그들은 자신의 과학 연구를 철학적으로 접근할 수 있었다. 창의성에 관심을 가진 다음 학자들은 이 점을 지적한다.

심리학자 가드너는 저서, 『열정과 기질』(Creating Minds)에서 다음과 같이 아인슈타인의 창의성에 비판적 사고가 필요했음을 지적한다.(Howard Gardner, 1993)

[아인슈타인은] 당시 물리학의 지배적인 패러다임과 의제를 그대로 받아들이지만은 않았기 때문에 획기적인 업적을 남길 수 있었다. 대신 그는 제1원리로 돌아가 가장 근본적인 물음을 제기하고 단순하면서도 가장 포괄적인 설명 원리를 찾고자 했다.⁴⁾

홍성욱과 이상욱은 저서, 『뉴턴과 아인슈타인, 우리가 몰랐던 천재들의 창조성⁵⁾』에서 다음과 같이 말한다(홍성욱과 이상욱, 2004).

천재적인 과학자로 이름을 남기려면 문제를 풀어내는 능력만큼이나 풀이가 가능한 문제를 만들어내는 능력 또한 탁월해야 한다. 뉴턴은 바로 이 점에서 창조성을 발휘했다고 할 수 있다.

뉴턴의 이런 문제의식과 창조적 실험은 이전 학자들의 연구를 비판적으로 읽어내는 습관을 통해 길러졌다.⁶⁾

본 연구자는 창의적 과학이론이 제안되기 위해 비판적, 즉, 반성적 사고가 중요하게 요구되며, 그것이 왜 그러한 것인지를 신경철학적 측면에서 해명하려 한다. 이러한 해명을 위해 우선적으로 비판적 사고가 무엇인지부터 규명되어야 한다. 본 연구는 철학의 비판적 사고를 다음 두 가지로 구분한다.

첫째, 어느 논의 또는 논증에 대해서 그것의 타당성 내지 적절성을 검토하기. (Critical Thinking 1: CT1)⁷⁾

둘째, 지금까지 당연시 여겨온 이론의 가정들에 대해서 또는 기초적 핵심 개념에 대해서 의문하기. (Critical Thinking 2: CT2)

3) 이러한 입장에 대한 반대 견해를 Weisberg(1999b)에서 볼 수 있다. 그의 관점에 따르면, 평범한 사고를 통해서 비범한 사고가 충분히 도출될 수 있다. 그 대표적 사례는 피카소의 작품, <게르티카>와 왓슨과 크릭의 DNA 발견이 있다. 그러나 본 연구자의 관점에 따르면, 피카소의 비범한 창의성을 설명하려면, 그의 특정한 작품의 탄생보다 그의 새로운 미술적 관점 자체가 어떻게 탄생될 수 있었는지에 초점을 맞춰야 한다. 또한 왓슨과 크릭이 다만 노벨상을 받았던 것은 그의 노력에 대한 성과라는 점에서 그 성과에 대한 인정만으로 비범한 창의성에 포함되기는 어렵다. 와이즈버거가 스스로 인정하듯이, 그는 당시의 믿음이나 사고방식으로부터 새로운 분기점을 마련한 연구들을 사례로 들어야 했다.

4) 가드너는 이렇게 지적함에도 불구하고, 근본적 물음이 어떻게 창의성을 산출할 수 있었는지에 관심을 갖지 않는다. 그보다 그는 피교육자의 교육환경이 중요하다는 점을 부각시키려 한다.

5) 일부 학자들은 ‘창조성’과 ‘창의성’의 의미를 구분하며, 지금의 논의에 ‘창의성’이 적절한 어휘라고 지적할 것이다. 그러나 본 연구의 의도를 정확히 전달하기 위해 그 용어의 명확한 구분이 반드시 필요하지는 않다. 더구나 여기 인용에서까지 원저자의 용어가 수정될 필요는 없다.

6) 두 저자는 창의적 작업에 비판적 물음이 필요함을 지적하지만, 그것이 왜 그렇다는 것인지에 대해서는 그다지 관심을 갖지 않는다. 그보다 그들은 과학자들의 창의적 업적은 기적보다 오랜 세월 노력의 결과라는 점을 부각시키려 한다.

7) 로슨은 여기에서 구분하는 ‘논리적으로 참을 검토하기’(CT1)가 창의성을 위해 중요함을 강조하고 있다. 그러면서도 그의 논문 표2(Table2)에서는 여기에서 구분하는 ‘기초적 개념에 질문하기’(CT2)를 학생들에게 권장할 것을 제안한다(Lawson, 2001). 이러한 측면에서 그는 두 비판적 사고의 차이와 그 역할을 구분하지 못한다고 평가된다.

이러한 철학적 두 시도, 즉 비판적 사고하기는 우리가 안다고 여기는 것에 대해 명확히 밝히기 위한 것들이다. 또한 그것들은 전통적으로 철학자들이 참된 앎과 그렇지 못한 앎을 명확히 구분하기 위한 시도이기도 하다.

앞에서 지적했듯이 본 연구자가 관심을 갖는 것은 ‘비범한 창의성’이며, 그것이 위의 둘째 종류의 비판적 사고, 즉 기초적 개념에 대해 의문하기(CT2)가 비범한(혁신적) 창의성의 원동력이라고 주장하려 한다. 이렇게 주장하려는 관점에서 나오는 창의적 접근법을 본 연구자는, ‘창의성 과정 접근법(PAC)’에 비교하여, “창의성 비판적 사고 접근법(Critical Thinking Approach of Creativity: CTAC)”이라 부르겠다.

이러한 방법론적 논의에서 본 연구자가 관심을 갖는 철학의 비판적 사고는 자신이 갖는 (넓은 또는 지배적인) 과학이론 내의 핵심적 기초 개념과 원리에 대한 회의와 의문하기(CT2)이다. 이것이 어떻게 창의성을 유도할 수 있었는지 과학사의 사례에서 찾아보자. 창의적 업적을 낸 과학자로 뉴턴과 아인슈타인은 과학계와 철학계 모두에 잘 알려져 있다.

뉴턴의 중요 저작으로 『자연철학의 수학적 원리』(Mathematical Principles of Natural Philosophy), 일명 “프린키피아”가 있다(Isaac Newton, 1687). 이 저서는 유클리드 기하학의 원리를 활용하여 물체의 운동을 설명하는 내용을 담고 있다. 그러나 그 책 내에서 유클리드 기하학이 다만 물체의 운동을 계산하기 위한 도구로만 활용된 것은 아니다. 그 책은 유클리드 기하학의 체계를 모방한다. 다시 말해서, 용어의 정의(definitions)를 포함하여, 공준(postulates)과 공리(axioms)로부터 정리(theorems)를 이끌어내는 유클리드 기하학의 “공리적 체계”를 그대로 따른다. 뉴턴은 용어의 정의, 공준으로 세 운동 법칙들, 공리와 같은 부칙들(corollaries)을 제시하고, 그런 것들로부터 정리인 케플러의 제2법칙을 유도한다. 이 저작물을 통해서 뉴턴이 이 연구에서 어떤 사고를 했을지 우리가 다음과 같이 추론하는 것은 어렵지 않다(박제윤, 2007). 그는 자신이 설명하려는 이론에 대해서 다음과 같이 반문, 즉 비판적으로 사고하였을 것이다. 내 학문은 어떤 체계이어야 하는가? 내가 아는 앎은 어떤 구성적 체계를 갖는가? 비록 그가 스스로 명확히 의식하고 이러한 반문을 하였든 아니든, 적어도 그는 데카

르트를 연구하고 유클리드 기하학을 공부하면서 왜 그러한 체계를 가져야 하는지를 명확히 이해하고 있었을 것이다. 만약 그러한 이해가 부족했다면, 유클리드 기하학 체계를 그렇게 명확히 그리고 철저히 따르지 않았을 것이다.

더구나 뉴턴은 자신의 역학이 실제 세계에 정확히 적용되기 위해서는 절대공간과 절대시간이 존재해야 한다고 주장하였다. 그러한 주장을 하기 위해서 그는 스스로 다음과 같이 반문했을 것이다. 과연 나의 지식이 실제 세계에서 옳은 것인가? 나의 지식이 사실적으로 참이기 위해 무엇이 더 필요할까? 내가 가정하는 시간과 공간은 무엇인가? 이러한 의문에서 그는 자신의 이론 내에 가장 기초적 개념으로 절대시간과 절대공간을 규정하였을 것이다.

뉴턴의 다른 중요 저작으로 『광학』(Optics)이 있다(Isaac Newton, 1704). 이 저작을 통해서 뉴턴은 학문의 방법론을 보여준다. 이러한 방법론은 갈릴레이의 방법론을 발전시킨 한 형태이며, 사실 그 두 방법론들은 아리스토텔레스의 방법론을 발전시킨 한 형태로 보인다. 아리스토텔레스는 과학자가 관찰을 통해서 귀납적으로 세계의 본질을 발견할 수 있다고 가정하였다(박제윤, 2006; Rose, 2001). 그에 따르면 본질은 일반화(또는 전칭긍정명제)로 표현될 수 있다. 그리고 그는 과학자가 그 일반화로부터 연역적으로 새로운 사실에 대한 설명과 예측을 할 수 있다고 가정하였다. (또한 퍼스Pierce에 따르면, 아리스토텔레스는 그 외에 귀추abduction를 구분하기도 했다. 모든 아이디어들은 귀추를 통해서 얻어진다. 귀추적 추론과 지각판단은 동일한 인지적 활동의 양면이다.) 데카르트는 과학 활동의 과정 또는 절차를 ‘분석’과 ‘종합’ 그리고 ‘실험’으로 파악하였다. 그 절차는 뉴턴에게 다음과 같이 나타난다. 우선적으로 과학자는 관찰을 통해 원리를 파악해야 한다. 그 과정을 뉴턴은 “분석”이라고 칭했다. 다음으로 과학자는 파악된 원리로부터 실험적 가설을 제안해야 한다. 이 과정을 뉴턴은 “종합”이라고 칭했다. 그리고 끝으로 과학자는 그 제안된 가설에 따라서 실험적으로 확인해야 한다. (본 연구자는 ‘분석’과 ‘종합’이란 아리스토텔레스의 ‘귀납’과 ‘연역’의 다른 명칭일 뿐으로 파악한다.) 이와 같이 뉴턴의 연구방법은 아리스토텔레스 또는 갈릴레이 연구방법의 모방이다. 뉴턴이 그러한 방법적 과정

을 자신의 저서에 명확히 활용한 것을 보면 그는 자신의 연구방법에 대해 다음과 같이 의문했을 것이다. 나의 연구방법은 정당화되는가? 나는 어떤 방법으로 연구해야 하는가? 비록 그가 이와 같이 명확히 반문하지 않았다고 하더라도, 아마도 과거의 연구자들을 공부하는 가운데 암묵적으로라도 자연스럽게 반문하였을 것이다. 그는 자신의 연구방법이 어떠한지 스스로 의문하고, 자신의 연구에서 그 필요성을 명확히 파악했을 것이다.

이러한 추정들을 통해서 우리는 뉴턴이 자신의 연구에 대해서 철학적으로, 즉 비판적으로 사고할 수 있었다고 여겨진다. 한 마디로 말해서, 그는 과학을 철학적으로 탐구했다.

다음으로 아인슈타인에게서 어떤 비판적 사고가 있었는지 살펴보자. 그는 저서, 『상대성이론이란 무엇인가?』(The Meaning of Relativity)에서 자신이 상대성이론을 제안하게 된 기초적 의문이 무엇인지를 밝힌다(Albert Einstein, 1922). 그의 비판적 의문은 시간과 공간이 무엇인가에서 출발한다. “시간과 공간에 대해 우리가 품고 있는 관습적 관념은 우리의 경험적 특성과 어떻게 관련될까?” 이러한 그의 의문은 다음 두 질문을 포괄하고 있다. 하나는 시간과 공간에 대한 관습적 관념에 관한 것이며, 다른 하나는 시간과 공간의 경험적 측면에 관한 것이다. 전자는 뉴턴이 주장했던 관습적 관념의 시간과 공간에 대한 의심이면서, 후자는 칸트가 주장했던 선형적 직관의 형식인 시간과 공간에 대한 의심이다. 그러한 의심을 하게 된 이유는 아래와 같이 추정된다. 그가 시간과 공간의 경험 가능성 측면에 관심을 기울이는 것은, 스위스 베른 주리히 대학의 대학원 시절에 가졌던 모임, 자칭 “올림피아 학파”에서 밀의 (귀납추론 중심의) 논리학과 로크의 인식론, 그리고 칸트를 읽고 토론했던 경력과 무관하지 않을 것이다.

우리는 일상적으로 그리고 관습적으로 이 세계에 정지된 그리고 균일한 간격의 공간이 존재하며, 그 속에 움직이는 사물들을 관찰하고 탐구할 수 있다고 생각한다. 그러나 만약 우리가 상대적으로 움직이는 사물의 거리를 고려해볼 때, 그 거리가 얼마가 될지를 말하기 어렵다. 어느 편을 기준으로 말하기 어렵기 때문이다. 달리는 열차 안에서의 2미터 이동 거리가 밖

에서 보면 그 거리가 아니며, 상대적으로 움직이는 옆의 열차에서 보면 또 다를 것이고, 지구 밖에서 보면 또 다를 것이다. 또한 우리는 일상에서 공간과 무관하게 균일한 시간이 흐르고 있는 절대시간을 (관습적으로) 가정한다. 그러나 공간적 거리는 속도와 시간의 관계에 의해서 계산될 수 있다. 이러한 점에서 공간은 시간과 무관할 수 없어 보인다. 이러한 의문들을 고려할 때 아인슈타인은 (뉴턴과 같이) 우리가 관습적으로 가정하는 절대공간과 절대시간에 대해 의심하게 된다. 그러므로 그는 “‘위치’와 ‘공간’이라는 말이 무엇을 의미하는가?”를 묻게 된다.

또한 칸트에 따르면, 시간과 공간은 세계에 존재하는 것이 아니라 인간이 갖는 ‘선형적 직관의 형식’이다. 만약 그렇게 시간과 공간을 가정한다면, 그것들이 세계에 존재하는 인식의 대상은 아닐 것이다. 그러한 생각은 현실을 탐구하는 과학의 영역에 적절하지 못하다. 그러한 생각에 대해서 아인슈타인은 다음과 같이 평가한다. “철학자들은 과학의 통제 아래에 있던 경험주의에서 핵심적인 개념과 생각들의 일부를 추출해, 높은 곳을 떠도는 구름처럼 붙잡기 힘든 선형적 영역으로 옮겨놓는다.” 물론 우리의 개념(관념)을 전적으로 감각 경험으로부터 논리적으로 이끌어낼 수는 없을 것이다. 분명 그것은 어떤 의미에서 인간에 의한 고안물이기도 하기 때문이다. 그러나 “관념이 우리의 경험을 벗어나 완전한 독립성을 구축한다고 가정하는 것은 옳지 못하다. 이는 특히 시간과 공간에 대한 관념에 있어 더욱 그렇다.”

지금까지 살펴본 바와 같이 아인슈타인은 물리학의 기초 개념인 시간과 공간 자체가 무엇인지 의문을 가진다. 그 의문은 일상적으로 또는 앞서 당연하게 받아들여진 개념에 대한 회의이다.

또한 현대 노벨상 수상자들이 한국에 최근 방문하여 제안한 조연에서도 비판적 질문이 창의성에 중요하다는 점을 지적한다. 2011년 8월 대전 한국과학기술원(KAIST)에서 열린 제5회 아시안 사이언스 캠프(ASC)의 과학 부문 노벨상 수상자 7명(조레스 알표로프, 고바야시 마코토, 더글러스 오셔로프, 고시바 마사토시, 리위안저, 아론 치에하노베르, 로저 콘버그)은 창의성을 기르기 위해 “아무것도 믿지 말라. 항상 의심하라!”고 권했다.⁸⁾

그렇다면 그렇게 회의하는 비판적 사고가 어떻게

8) <http://joongang.joinsmsn.com/article/aid/2011/08/12/5610468.html?cloc=nnc>

새로운 이론을 낳는가? 이 질문에 대한 대답을 어느 방향에서 찾아보아야 할까? 가드너의 아래 이야기는 본 연구자의 관심을 끈다(Gardner, 1993).

우리는 창조적인 인물의 ... 신경 체계의 구조나 기능에 남다른 특징이 있는지에 대해 잘 알지 못한다. 하지만 과학적인 창조성 연구라면 결국 이러한 생물학적 질문에 대답할 수 있어야 한다. 나는 곧 이 방면의 연구가 수행되리라고 기대하고 있다.

3. 신경계의 개념과 이론

철학의 비판적 사고가 어떻게 새로운 이론을 창안할 원동력이 되는지를 본 연구가 현대 신경과학 연구 성과에 근거해서 논증하려면, 불가피하게 그 연구 성과가 무엇인지부터 정리할 필요가 있다. 그리고 그것으로부터 뇌가 어떻게 새로운 과학의 개념과 이론을 창조하는지를 본 연구가 해명하려면, 뇌 내부에 개념과 이론의 기능이 어떻게 조성되는지도 알아보아야 한다. 그런 다음에 비판적 사고가 어떻게 새로운 이론의 형성에 도움이 되는지를 밝혀야 할 것이다.

위와 같은 과제들을 수행하기 위해 우선적으로 대답되어야 하는 의문은 다음 질문에 대한 대답이다. 뇌(또는 신경계)는 세계에 대한 표상을 어떻게 담아내는가? 이러한 질문에 대한 대답을 처칠랜드 부부(The Churchlands)의 “상태공간 표상이론(the state space theory of representation)”에서 찾아볼 수 있다. 그들에 따르면, 뇌는 세계에 대한 표상들을 합수적으로 계산처리(processing)할 기능으로서 국소 기능 대응도(topographic maps, 이후로 이것을 “국소대응도”라 약칭한다.)를 갖는다(Paul Churchland, 1989, 2012; Patricia Churchland, 1986, 2002; Patricia & Paul Churchland, 2002). 대응도가 세상을 어떻게 표상하고 계산(처리)하는지 아래와 같이 설명된다.

전통적으로 철학자들은 표상을 언어의 단어 또는 문장에 대응하는 무엇으로 보았다. 그러나 폴 처칠랜드는 저서, 『신경계산적 전망』(Neurocomputational perspective)에서 신경계의 측면에서 새로운 표상 이론을 주장한다(Paul Churchland, 1989). 그의 주장에 따르면, 표상이란 신경세포 집단이 세계에 대해 반응하는 정도, 즉 숫자들 조합으로 표현된다. (그림1)과

같이 외부로부터 수용기(receptors)를 통해 신경세포 집단으로 들어오는 입력정보는 숫자 조합 (a, b, c, d)로, 그리고 시냅스에서 변조되어 출력되는 정보는 숫자 조합 (x, y, z)로 표현된다. 이것은 4차원 공간의 특정 지점에서 3차원 공간의 특정지점으로, 다시 말해서 4차원의 특정 벡터가 3차원의 특정 벡터로 변환되는 것으로 이해될 수 있다. 입력정보로부터 출력정보로 변환(transformation)은 시냅스 가중치(weights)의 상태(p_i, q_j, r_k)에 의해 결정된다.

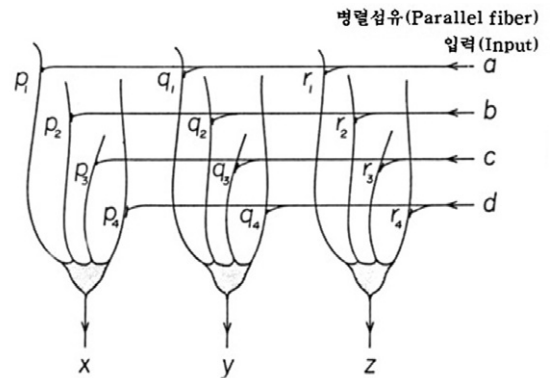


그림 1 신경망 행렬(neural network matrix)의 도식적 그림: 신경세포들이 어떻게 물리적인 행렬처리, 즉 벡터 대 벡터 변환(vector to vector transformations)을 효과적으로 수행할지 알아볼 수 있다. (Paul Churchland, 1989, 저자로부터 허락을 받아 인용)

위와 같은 입력-출력 변환 처리 작용이 일어나는 가운데 출력정보의 결과는 시냅스 연결 상태인 가중치 (p_i, q_j, r_k)의 강도를 조금 더 높게 그리고 낮게 변화시킨다. 이러한 변화는 신경계에 “가소성(plasticity)”을 부여한다. 다시 말해서 신경세포들은 경험에 따라 자신의 그물망의 연결 상태를 스스로 변화시킨다. 그러한 연결 상태의 변화가 신경망의 학습 결과이다. 이렇게 변화된 시냅스 가중치 상태는 다음의 입력정보에 대해 이전과는 다르게 변조되어, 신경계의 그물망으로 하여금 이전과 다른 출력정보를 산출하게 할 것이다.

신경계의 그물망은 (그림2a)와 같이 그 자체가 감각 입력정보를 운동 출력정보로 변환하는 계산기라고 할 수 있다. 가상적 게(crab)의 눈이 대상을 바라본 방향의 숫자는 감각 국소대응도(sensory topographic maps)에 표현되며, 그것은 다시 운동 국소대응도(motor topographic maps)에 표현된다. 그러한 과정에서 두 국소대응도가 처리하는 것은 감각 대응도

의 숫자 조합을 운동 국소대응도의 숫자 조합으로 변환하는 것이다. (그림2b)의 브로드만 영역 구분에서 볼 수 있듯이, 신경계는 기본적으로 그러한 기능적 구조들로 구성되어있다. 만약 두 국소대응도 사이에 가소성이 있어 경험적으로 수정이 가능하다면, 이러한 동일 경험-수정 방식은 감각-운동 조절 기능을 넘어 고차원적 학습에도 적용될 것으로 가정된다. 그러므로 다음과 같이 주장될 수 있다. 그러한 경험적 학습으로 조성된 시냅스 변조는 다음의 관찰 또는 경험을 위한 배경 믿음의 기반이기도 하다. (이런 측면에서 귀추적 추론과 지각 판단을 명확히 구분하기 어렵다고 본 퍼스의 이야기는 어느 정도 설득력이 있어 보인다. 우리가 단지 경험하는 것만으로도 신경계는 배경적 믿음을 조성할 수 있기 때문이다.)

위의 신경표상 이론으로부터 신경계의 감각-운동 조절 기능을 설명하는 것이 처칠랜드 부부의 최종 목표는 아니다. 그들은 위의 표상이론으로부터 다음과 같은 의문에 대답하려 한다. 시냅스 상태가 세계에 대해 적절히 반응하게 할 인지의 지표, 즉 개념을 어떻게 담아내는가?

(그림3a)와 같이 망막에는 각기 다른 파장의 빛에 민감하게 반응하는 수용기인 원추세포(cones)가 있다. 그 세포 집단이 반응한 숫자들 조합은 (그림3b)의 위상 상태공간(phase state spaces)의 특정 지점으로 표현될 수 있다. 그 공간에서 만약 특정 숫자들 조

합인 시냅스 가중치 상태(p_i, q_j, r_k)가 특정 감각입력 정보에 특별히 민감하게 반응하는 상태가 될 경우를 가정해보자. 그러면 그 시냅스 가중치 상태를 우리는 세계를 분별한 인지의 지표라고 생각할 수 있다. 예를 들어 특정 빛의 반응을 시냅스 연결망이 위상 상태공간(그림3b) 내의 오렌지(orange) 색의 수준에서 민감하게 반응한다면, 우리는 그것을 그 색깔에 유사한 것으로 분별할 기준을 갖는 셈이다. 이러한 측면에서 신경망은 우리의 개념을 담아낼 구조인 셈이다.

이제 '개념'을 넘어 '이론'과 같은 기능이 신경계 내에 어떻게 작동될지 해명이 필요하다. 이론이란, 전통적으로 철학자들이 파악했듯이, 예측과 설명을 제공하는 기능이다. 이러한 기능이 위의 처칠랜드 표상 이론의 배경에서, 어떻게 해명될 수 있을까? 폴 처칠랜드는 단순한 가상적 (생물체 또는 로봇) 계(crab)가 어떻게 예측된 행동을 할 수 있을지 신경학적으로 추정해본다. (그림4)의 좌측은, (그림2a)의 감각입력 그물망인 대응도와 운동출력 대응도 이외에, 물체가 날아가는 운동에 대한 표상을 담아내는 실제 공간 국소대응도를 하나 더 추가한 그림이다. 이러한 추가적 실제 공간 대응도는 그림에서 표현되듯이 날아가는 물체의 이동경로 위치에 대한 모든 예화 표상들을 담아낸다. 따라서 그림의 가상적 장치는 날아가는 물체의 운동을 바라보는 것만으로도 그 물체의 예상된 궤적을 표상하는 동시에 계산(처리)해내어, 미리 그곳으로

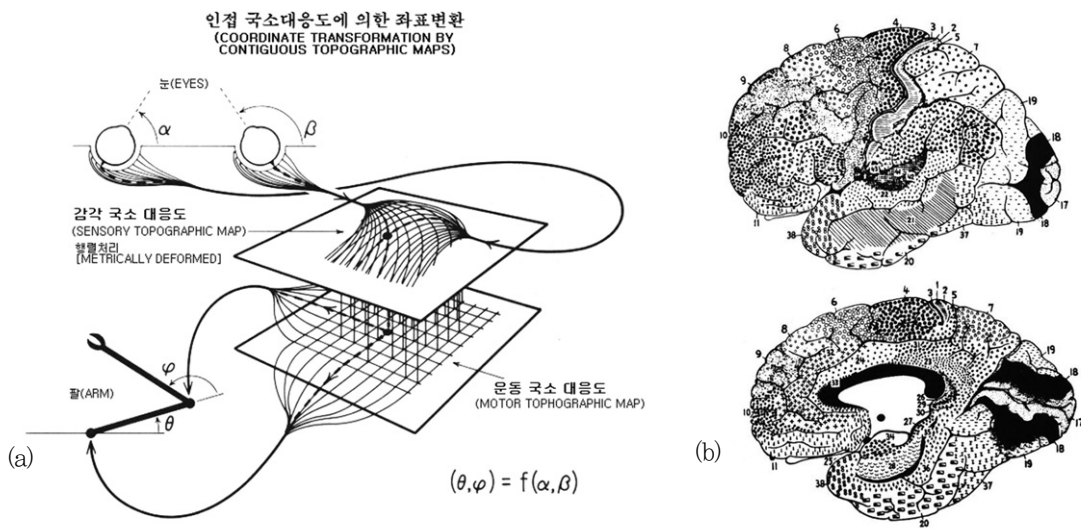


그림 2 (a) 신경계의 그물망이 동물의 감각-운동 조절을 어떻게 용이하게 수행할지 보여주는 도식적 그림. (b) 브로드만 영역(Brodman areas)을 보여주는 그림. (Paul Churuchland, 1989. 저자로부터 허락을 받아 인용.)

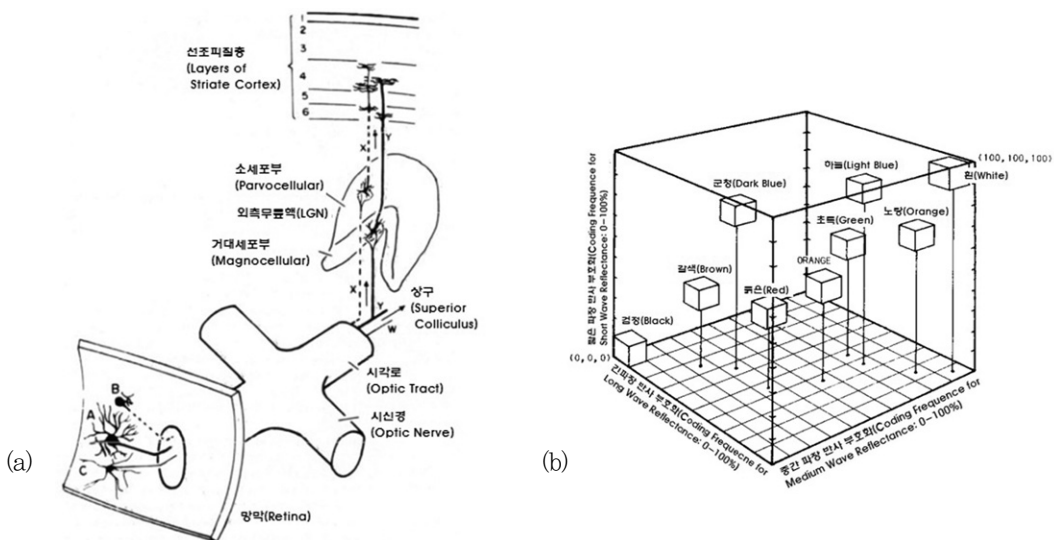


그림 3 (a) 망막의 세 종류의 원추세포 A, B, C 등이 시상(thalamus) 내의 외측무릎핵(LGN)을 지나 뇌 피질 6층판(layers) 구조 중 일부에 연결되는 것을 보여주는 도식적 그림. (b) 색깔 상태 공간(color state space)의 도식적 그림으로, 세 원추세포의 반응이 어떻게 다양한 색깔을 인식하게 해줄지 보여주며, 동시에 색깔들을 구분할 지표를 담아내는지를 위상 상태공간의 위치로 보여준다. (Patricia Churchland, 1986.; Paul Churchland, 1989. 저자로부터 허락을 받아 인용.)

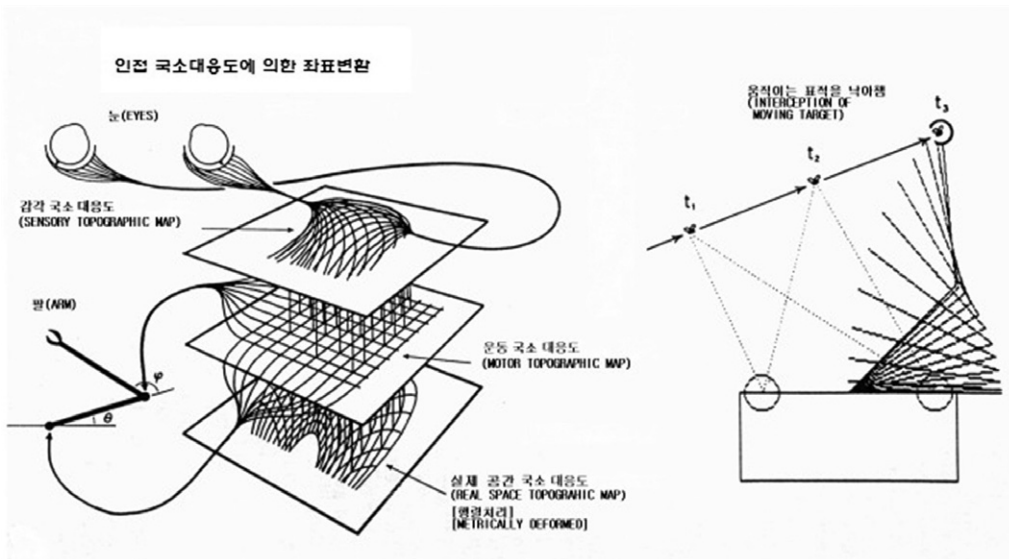


그림 4 신경계의 그물망이 예측 행동 조절을 어떻게 이행할지를 보여주는 도식적 그림. (Patricia Churchland 1986. 저자로부터 허락을 받아 인용.)

팔을 뻗어 물체를 잡아챌 수 있다. 이러한 예측적 기능은 신경망이 수학적 변환의 함수적 기능을 갖는다는 것을 의미한다.

이러한 처칠랜드의 사고실험에 근거하여 본 연구자는 다음과 같이 주장한다. 실제로 신경계는 위의 유지

한 장치를 넘어 수많은 국소대응도들이 서로 연결된 복잡한 구조를 이루고 있으며, 따라서 그것은 정교하고 복잡한 예측 행동을 조절할 기능을 가질 것이다. 그리고 직접적 외부 입력정보가 없을 경우에도, 내부적으로 입력정보를 임의로 입력시키고 자신의 연결망

에 계산을 수행시킨다면, 그 복잡한 그물망은 어떤 행동으로 인한 미래의 결과를 예측할 수 있을 것이다. 나아가서 그러한 기능적 그물망은 이미 일어난 일 혹은 미래 일어날 일에 대해 설명을 제공할 구조물인 셈이다. 이렇게 바라보는 전망에서 다음과 같이 말할 수 있다. 신경망의 대응도는 이론적 기능을 담아낼 구조물이다. (이러한 이야기는 앞으로 우리가 개념과 이론(가설)을 담아내는 인공지능을 어떻게 만들어야 하는지도 전망하게 해준다.)

이제까지 이야기를 통해서 신경계가 세계에 대한 표상을 어떻게 가지는지, 그리고 대상들의 분류 기준인 범주를 어떻게 가지며, 예측을 가능하게 하는 이론적 기능을 어떻게 용이하게 발휘하는지에 관한 가설을 밝혔다. 다시 말해서 이제 우리는 신경계가 어떻게 개념과 이론의 기능을 발휘하는지 말할 수 있다. 이제 비로소 우리 인류는 철학자들이 궁금해왔던 개념이 무엇인지 설명할 수 있으며, 관찰로부터 (또는 관찰이 배제되고) 우리가 어떻게 이론을 가질지도 설명할 수 있다. “이론(theory)”이란 뇌의 국소대응도(topographic maps)가 갖는 “함수적(계산적) 기능(computational functions)”이다. 뇌는 새로운 예측과 설명을 위해 새로운 대응도를 형성하거나, 기존의 대응도를 수정하는 능력을 가지며, 대응도들 사이의 연결망을 새롭게 형성할 것이다.

그러한 표상이론의 관점에서, “창의적 이론”이란 과거의 대응도들이 수행하던 기능에서 새로운 포괄적 설명과 예측을 내놓을 통합적 대응도의 연결망 형성 그 자체이다. 그렇다면 지금까지 해명된 신경표상이론을 근거로, 철학의 비판적 사고는 과학자들로 하여금 어떻게 창의적 이론을 갖도록 촉발하겠는가?

4. 신경망의 이론 습득 가능성

신경계가 어떻게 새로운 이론적 도구를 가져서 생존에 유리한 꾀를 발휘할지 설명하려면, 신경계 시냅스가 어떻게 학습할 수 있는지 기초적 이야기가 필요하다. (그림5a)는 태평양에 서식하는 아플라시아(군소 sea hare, *Aplysia Californica*)의 신체적 구조를 보여준다. 이것의 흡수관 부분에 실험자가 주사기 바늘로 물을 쏘아대면, 처음에 움츠리는 행동을 보인다. 그렇지만 여러 번 반복된 실험을 통해 아플라시아는 물을 맞고도 별일 아니라는 듯이 유유히 돌아다닌다. 이러한 행동 변화는 “습성화(habituation)”라고 불린다. 반면에 주사기 바늘로 머리 부분을 찌러대면 움츠리는 행동을 보인다. 이것을 여러 번 반복하면, 바늘을 머리에 살짝 대기만 하는 것으로도 심하게 머리를 움츠린다. 이러한 행동 변화는 “민감화(sensitization)”라고 불린다. (그림5b)는 아플라시아의 단순한 신경연

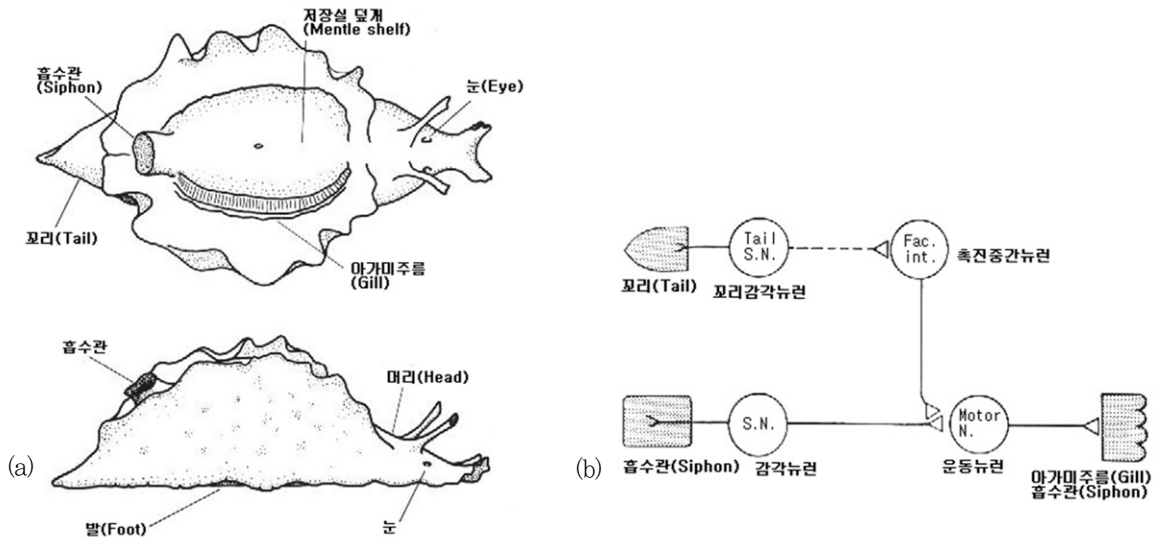


그림 5 (a)아플라시아(군소)의 신체적 구조를 보여주는 도식적 그림. (Bullock 1984) (b)아플라시아의 단순한 신경연결을 보여주는 도식적 그림. 흡수관을 자극하는 24개의 뉴런과 아가미를 자극하는 6개의 뉴런이 있으나 그림에서는 하나만을 그렸다. (Hawkins and Kandel, 1984.) (Patricia Churchland, 1986. 저자로부터 허락을 받아 재인용.)

결을 보여준다. 바다 달팽이 아플라시아는 이러한 단순한 신경 연결만을 가지고 그러한 학습을 이루어낸다. 우리는 이러한 학습을 어떻게 이해해야 할까? 그저 약한 자극에는 반응이 둔감해지고, 강한 자극에는 반응이 강화되는 것 오직 그것뿐이다. 다시 말해서 시냅스의 강도를 강화하거나 약화시키는 것만으로 성취되는 학습이다.

위와 같이 단순한 신경세포의 연결에서 학습이 성취되는 원리를 연결주의 인공지능(connectionist AI)에 활용한 연구로 헤브가 있다(Hebb, 1949). 그 원리는 다음과 같다. 만약 두 뉴런이 동시에 격발할 경우 그 양자 사이의 연결(즉, 시냅스)는 강화된다. 이것을 “헤브의 법칙”(Hebb’s law, $w_{ij}(k+1)=a_i a_j$)이라고 부른다. 이러한 헤브의 법칙은 “관계학습(correlation learning)”이라고도 불린다.(헤브의 법칙은 오직 뉴런 사이에 흥분성의 효과만을 사용할 뿐, 억제성의 효과가 고려되진 않았으며, 따라서 시냅스의 연결 강도가 강화될 뿐이었다.) 이러한 학습 원리는 보다 발전되어 오류역전파(back-propagation of error)라는 학습 알고리즘에 의해 시냅스의 연결 가중치를 수정하는 방식으로 발전되었다. 오류역전파의 방식의 학습 알고리즘, 즉 델타규칙(delta-rule)에 의해 신경망은 오류를 최소화하도록 학습이 이루어진다. 이러한 학습은 복잡한 상호활동 시스템에서 경사하강에 의해 마치 스스로 목표를 찾아가는 것에 비유된다. (그림6)은 임의의 신경

망 상태가 시냅스 가중치를 수정함에 의해 안정된 상태로 진행되는 과정을 보여준다.

이러한 오류역전파에 의해 시냅스의 가중치 강도를 강화하고 약화하는 수정만으로 신경계는 어떻게 새로운 예측기능을 담아낼지 다음과 같이 설명될 수 있다. 입력과 출력에 따른 은닉유닛(hidden units)의 시냅스 가중치는 스스로의 규칙에 따라서 변화될 수 있다. 이렇게 변화된 시냅스 가중치는 연결망 전체에게 세계에 대한 인지적 기능에 변화를 줄 것이며, 세계에 대한 예측행동 능력에 변화를 가져다 줄 것이다. 이상과 같이 신경계를 모방한 신경망 이야기를 과학자들이 갖는 학문적 이론의 형성에 근거라고 가정할 경우, 무엇이 문제인가? 본 연구의 중심 문제는 과학자들이 (참신한) 새로운 이론을 어떻게 고안하는가이다.

5. 비판적 사고와 창의성

본 연구자는 ‘창의성’ 자체보다 ‘새로운 이론’ 또는 ‘새로운 이론적 기능’에 주목한다. 그리고 신경계 내에 새로운 이론 또는 이론적 기능이 국소대응도의 새로운 조성으로 파악한다. 앞서 설명된 바와 같은 은닉 유닛층 국소대응도에 조성되는 것이 곧 이론적 기능이다. 우리의 경험이 신경계에 이론적 기능을 구축한다고 가정할 때, 그러한 구축에 비판적 사고는 어떤 역할을 하겠는가? 철학의 비판적 사고는 뇌에 어떤 작

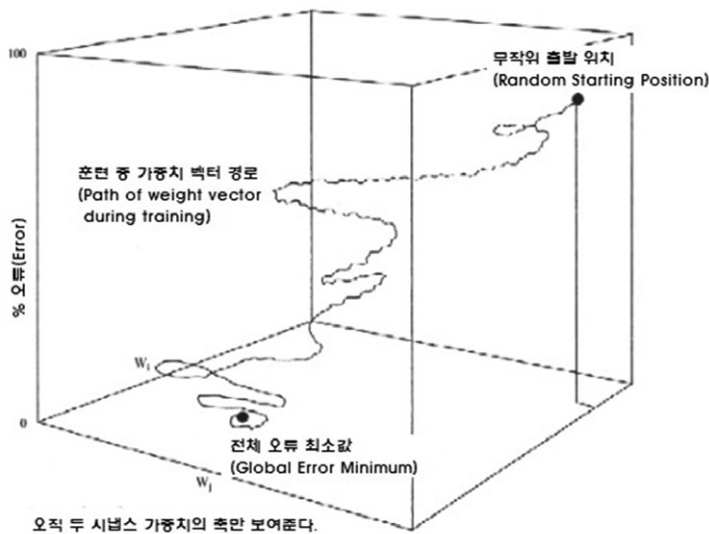


그림 6 가중치/오류 공간에서 경사하강(gradient descent)을 보여주는 도식적 그림. (Paul Churchland, 1989. 저자로부터 허락을 받아 인용.)

용을 하여 새로운 국소대응도 연결망을 형성하게 만들겠는가?

이 의문에 대한 대답이 연결주의 인공지능 연구 사례에서 발견된다. 오류역전파에 의한 대응도 수정은 한정된 학습규칙에 의해 이루어진다. 앞서 설명했듯이 역전파에 의한 오류의 수정은 학습규칙으로 델타-규칙이 적용된다. 그 규칙은 시냅스 이전과 이후의 반응에 따라 시냅스의 연결 강도(가중치)를 조금씩 강화 또는 약화시키라는 지침이다. 그런데 그 지침에 따라서 시냅스 그물망 전체의 수정은 오류를 최소화하는데 실패할 수 있다. 일부 시냅스 가중치를 강화한 것으로 인해서 다른 시냅스 가중치의 강도에 영향을 미칠 수 있으며, 반대로 다른 일부 시냅스의 가중치의 강도가 반대로 이쪽에 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 다시 말해서, 시냅스 그물망 전체를 지휘하여 수정하게 할 어떤 지침이 없이, 그 전체의 오류를 최소화하는 것으로는 최종 목표를 찾지 못할 수도 있다. (그림 7)에서 볼 수 있듯이 신경망은 은닉층 유닛들 총합의 오류 수정에서 전체 최소값(global minimum) 지점 b에 이르지 못하고 국소 최소값(local minimum) 지점 a에 머무를 가능성이 있다. 다시 말해서 일부 시냅스의 변화가 전체적으로 최종의 오류 최소값에 이르지 못하고 맴돌 수 있다. 이럴 경우 연결주의 인공지능 설계자들은 학습규칙에 요동(fluctuation)을 주어 시스템의 에너지 값이 그곳을 탈출하게 한다. 이러한 공학적 기법을 비판적 사고와 관련시켜 다음과 같이 (비유적으로) 설명해보자.

앞서 설명했듯이, 어느 과학자가 가진 신경계의 국

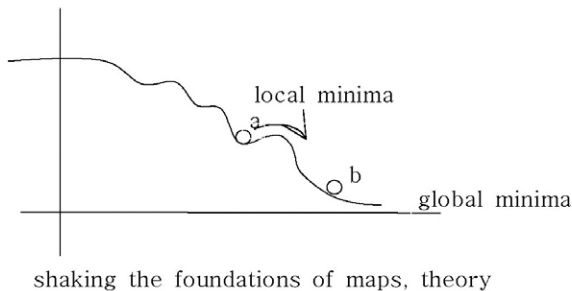


그림 7 오류 수정에 의해서 전체 시스템의 에너지 값(e)은 점차 감소한다. 그렇지만 일부 구간에서는 국소 최소값(local minimum)에 빠져서 나오지 못할 수 있다. 그럴 경우에 요동(fluctuation)을 주어 국소 최소값에서 탈출시킬 수 있다.

소대응도에 입력정보가 출력정보로 통과하는 과정에서 인지적 과제와 예측적 과제가 동시에 수행된다. 그러는 동시에 신경계는 자신의 국소대응도로 조성되는 이론체계의 수정을 유도할 것이다. 그런데 그러한 과정에서 기존의 국소대응도는 새로운 또는 특정 문제에 대한 해답을 구하지 못하면서도, 스스로의 새로운 수정도 이루지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 설명하기 어려운 문제를 만나 이론적 국소대응도의 일부를 수정하려 하지만, 다른 국소대응도와와의 관계로 인해서 그 국소대응도는 새롭게 과제를 해결할 오류 최소화 방안을 찾지 못할 수 있기 때문이다. 이러한 경우에 과학자는 스스로 자신의 신경망에 요동을 줄 필요가 있다. 자신이 갖는 이론체계의 기초적 핵심 개념 또는 이론을 흔들어 보는 것이다. 예를 들어, 시간이 무엇인가, 그리고 공간이란 무엇인가? 이러한 질문을 통해서 지금까지 명확히 안다고 가정되었던 자신의 단순한 개념이 바뀌면, 그에 따라 연쇄적으로 자신의 이론체계의 그물망 전체에 수정이 이루어지게 하는 것이다. (아마도 아인슈타인이 그렇게 했을 듯싶다.)

위의 이야기를 조금 더 이해하기 쉽게 시각적으로 설명해보자. 아래 (그림8)은 국소대응도의 함수적 기능을 상징적으로 보여주는 그림이다. (그림8a)에서 왼쪽 아래의 웅덩이 모양 G는 갈릴레이 이론이며 오른쪽 웅덩이 모양 A는 아리스토텔레스의 이론이라고 가정해보자. 과학을 공부하는 어느 어린 학생이 아리스토텔레스의 관점에서 상식적 개념과 이론을 가지고 있으면서 동시에 갈릴레이 이론의 일부를 공부한 상태라고 가정해보자. 그 학생의 국소대응도는 그 두 이론들 사이에 일치점이 적어 통합된 하나의 체계로 문제를 원활히 해결하지 못하는 상태에 있을 것이다. 그러므로 대부분의 자연 현상에 대해서는 아리스토텔레스처럼 생각하고, 일부 현상들에 대해서는 갈릴레이처럼 추론할 것이다. 그런데 만약 그 학생이 그 상태에서 의문을 던져 웅덩이가 아래 핵심 개념, 즉 끌개(attractors)를 흔든다고 가정해보자. “운동”이란 무엇인가? 운동은 어떻게 일어나는가? 물체는 왜 떨어지는가? 나의 지식은 어떻게 조직화되어야 하는가? 이러한 궁극적 질문들을 통해서 그 학생의 국소대응도는 스스로 새로운 모습, 즉 새로운 개념체계(conceptual framework)를 찾아낼 것이다. (아마 뉴턴이 그러했을 듯싶다.) 앞에서 설명되었듯이, 국소대응도는 스스로 최적의 응답을 찾아가기 때문이다. 그

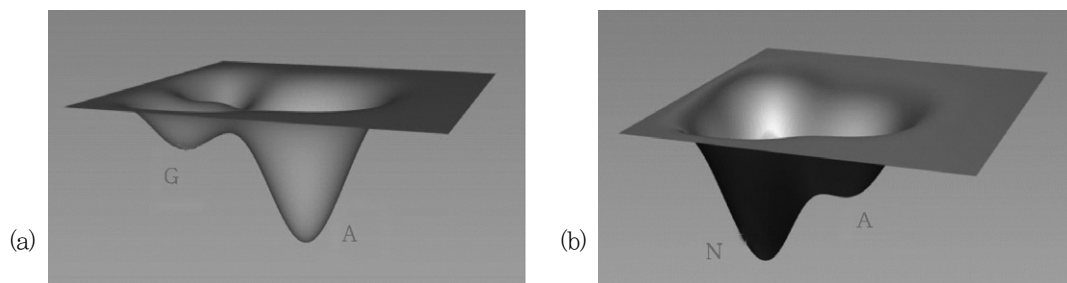


그림 8 국소대응도의 기능을 가지적으로 보여주기 위한 상징적 그림. G, A, N. (a)에서 이론G보다 이론A가 유력하였으나, 아래의 꼭지점 부위인 끌개(attractor)에 요동을 주면 신경계는 자기조직화(self-organizing) 기능에 의해 새로운 이론 그물망을 형성한다. 그 결과 (b)에서는 새로운 이론 N이 형성되었고, 이론 A는 N에 흡수 통합된다.

러는 과정에서 스스로 뉴턴과 유사한 해결방안을 모색하게 된다면, 국소대응도는 (그림8b)와 같이 변조될 것이다. 어떻게 그러할 수 있는가?

자신이 알고 있는 기초적 핵심 개념을 흔들기(CT2)는, 위 그림의 아래 꼭지점인 끌개를 흔들어보는 것과 같다. 그렇게 흔들기만 하면 새로운 국소대응도 형성이 되는가? 지금까지 가설적으로 설명한 관점에서 그렇다고 말할 수 있다. 신경망에 요동을 주기만 하면, 그것은 오류 전체 최소값을 스스로 찾아낼 수 있기 때문이다. 신경계는 자기-조직화 시스템(self-organizing system)이다. 자기-조직화 시스템이란 현재 수학, 물리학, 컴퓨터 공학 등에서 이론적으로 널리 활용되는 개념이다. 과학의 발전을 창의성과 관련한 주제와 관련시켜 볼 때 복잡계(complex system) 이론은 우리가 이제까지 알 수 없었던 새롭고 신선한 통찰을 얻게 해준다. (Miller, 1996) 신경 연결망을 흔들어 주는 것만으로도 신경계는 스스로 새로운 연결망을 조직화 할 것이다.⁹⁾

자연이 복잡성을 보이는 이유는 구성요소가 많은 거대 시스템이 스스로 (작은 자극만으로도 큰 상태의 변화를 일으키는) 임계상태(critical state)로 진화하려는 경향이 있기 때문이다. 이러한 진화는 외부의 계획과 간섭 없이 오로지 시스템 내부의 요소들만의 역동적 관계만으로 일어난다. 인간의 뇌 역시 어느 명확한 외부 조절 없이 지속적이며 자동적으로 새로운 사고의 틀인 신경망을 탄생시킨다(Andreasen, 2005;

Fox & Friston, 2012). 이러한 자동적 자기-조직화를 통해서 신경망인 상위 차원의 과학이론들과 하위 차원의 과학이론들은 상호적으로 조율하며, 이러한 조율을 통해서 그물망은 상호적으로 적절하지 않은 이론의 신경망 부분을 수정, 교정 또는 제거하여 전체적 통합적 체계를 갖춰나간다(Patricia Churchland, 2002). 이렇게 형성되는 신경망 전체는 우리가 소위 “개념체계” 또는 “이론체계”라 부르는 우리의 전체 배경지식의 그물망을 형성할 것이다.

앤더슨에 따르면, 비범한 창의성을 발휘한 사람은 일정 기간 동안에 신경계를 확장시킬 것이다(Andreasen, 2005). (물론 이 확장된 신경계는 후에 평범한 창의성을 발휘하는 데에 잘 활용될 것이긴 하다.) 비범한 창의성이 가능하기 위해서는 근본적으로 새로운 신경망의 확장 내지 변조가 일어나야만 한다. 그렇게 되기 위해서는 기존 신경망의 조직해체(disorganization)가 먼저 선행되어야 하며, 그 해체에 이어서 신경망은 (우리가 의식적으로 파악할 수 없는 방식으로) 자기-조직화를 이뤄낸다. 그 결과 비범한 창의성을 발휘한 사람은 이전과 다르게 세계를 파악할 메커니즘, 즉 인식의 틀을 갖게 된다.

이러한 신경망 집단의 자기-조직화의 수정 과정은 개인이 스스로의 반성에 의해 알 수 있는 의식 수준 이하에서 일어난다.¹⁰⁾ 그러므로 혁신적 이론을 발견한 과학자 누구에게든 어떻게 그렇게 창의적인 발상을 하게 되었는지 물어본다면, 아마도 이렇게 대답할 것

9) 이러한 측면에서 우리의 호기심 역시 신경망을 흔드는 역할을 할 것이다. 우리가 세계에 대해 호기심을 갖게 된다면, 그것은 곧 신경망에 피드백을 주어 새로운 조직화를 유도할 것이기 때문이다. 그러므로 새로운 발견을 위해 연구자들에게 호기심을 가지라는 조언은 언제나 있어왔다. 그리고 그것이 왜 긍정되는지도 이제 설명된다. 물론 이러한 측면에서, 기존의 유력한 이론에 대해 명확히 오류를 지적하는 비판적사고(CT1) 역시 신경망에 피드백을 주어 새로운 신경망을 조성하는 효과를 발휘할 것으로 추론된다.

10) 이러한 견해에 대한 반대 입장을 와이즈버그에서 볼 수 있다. 그는 그 이유로 비범한 창의성을 발휘했던 학자들의 말과 글이 실제 그들의 것인지 아니면 전임 학자들의 것을 활용한 것인지 신뢰할 수 없기 때문임을 밝힌다(Weisberg, 1999).

이다. “하여튼 어떻게 되었습니다.” “나도 알지 못하지만, 그냥 떠올랐습니다.” “저절로 알게 되었습니다.” 과학철학자 포퍼는 과학자가 과학이론을 어떻게 창안하는지 밝힐 수 없다는 것을 명확히 인식하고 이렇게 말했다(Popper, 1934).

과학자가 하는 일이란 이론을 내놓고 시험하는 것이 [전부이다]. 그 초기 단계, 즉 어느 이론을 확신하고 창안하는 활동은, 내가 보기에, 그것에 대해 논리적 분석이나 수용을 요청해서 [될 일이] 아닐 듯싶다.

루트벤스타인 부부는 『생각의 탄생』(Sparks of Genius)의 서문에서 이렇게 말한다(Robert & Michele Root-Bernstein, 1999).

모든 분야에서 창조적 사고는 언어로 표현되기 전부터 나타나며, 논리학이나 언어학 법칙이 작동하기 전에 감정과 직관, 이미지와 몸의 느낌을 통해 그 존재를 드러낸다. ... 상상력이란 이미 있는 것들을 통합해서 새것으로 만들어내는 능력이다.

그들의 인용에 따르면, 아인슈타인은 이렇게 말한다.

나는 직감과 직관, 사고 내부에서 본질이라고 할 수 있는 심상이 먼저 나타난다. 말이나 숫자는 이것의 표현수단에 불과하다. ... 과학자는 공식(수식)으로 사고하지 않는다.

과학의 방법에 대해 후대의 학자들로부터 주목을 받는 과학철학자 포퍼는 물론, 창의성에 대한 전문 연구가, 그리고 가장 창의적 과학자로 주목받는 아인슈타인까지 창의적 과학이론이 어떻게 제안되는지 우리가 의식적 언어로 밝힐 수 없음을 고백하고 있다. 이것이 왜 그러한가? 지금까지 본 연구자의 신경학적 해명에 따르면, 우리의 과학적 개념과 이론의 기초인 국소대응도는 의식 이하의 수준에서 조성되기 때문이다.¹¹⁾

6. 결론: 과학자가 철학적 태도를 가져야 하는 이유

본 연구자는 지금까지 창의적 이론의 탄생에 대한

신경철학적 해명을 통해 다음과 같은 주장을 하였다. 새로운 대응도 연결망을 형성하거나, 기존의 국소대응도 연결망에 큰 변화를 주려면, 기존의 국소대응도 자체에 심각한 회의가 앞서야 한다. 다시 말해서, 새로운 국소대응도의 자기-조직화에 앞서 그물망들의 핵심적 표상을 흔들어보는 비판적 사고가 우선되어야 한다.

철학자들의 비판적 질문은 지극히 당연한 것에 던지는 의문이다. 예를 들어 플라톤은 둥근 사물들을 보면서 (누구나 둥근 것을 둥근 것으로 알아볼 수 있다는 것을 그가 알고 있음에도 불구하고) 우리가 그것들을 둥글다고 볼 수 있는 이유가 무엇인지 물었다. 그리하여 그는 우리가 눈으로 볼 수 없는 일종의 개념적 존재인 ‘이デア’(Idea)가 있어야 한다는 것을 주장하게 되었다. 또한 아리스토텔레스는 (누구나 알고 있듯이) 계란에서 닭이 나오는 것을 관찰하면서도 그것이 어떻게 가능한지 의문을 던졌다. 이 질문을 통해 그는 계란에 닭이 될 ‘본성’이 있기 때문이라고 대답하고, 그 본성의 종류를 빛(형상인, 질료인, 작용인, 목적인)으로 구분하기도 하였다. 이후로도 아주 당연한 것으로 여겨지는 것들에 대해 의문을 던지는 것은 철학자들이 언제나 강조해온 태도이다(박제윤, 2006). 뉴턴의 중력이론 역시 지극히 당연하며 누구나 알고 있는 것, 즉 모든 물체가 떨어진다는 사실에 의문을 던진 것에서 비롯되었다. 사람들 모두가 사물이 높은 곳에서 낮은 곳으로 떨어진다는 것을 알았지만, 뉴턴 이전까지 그 당연한 사실에 직접적으로 의문을 던지지는 않았다.(박제윤, 2007) 이렇게 새로운 창의적 이론은 비판적 질문에서 출발한다. 그러므로 그러한 비판적 태도는 창의성의 원동력이다. 이러한 주장에 대해서 다음과 같은 두 가지 의문이 제기될 수 있다.

첫째, 무의식적인 신경세포의 자기-조직화가 어떻게 의식에 지배를 받는가?

아직 신경학적으로 의식을 해명하지 못하는 지금의 신경학적 연구 단계에서 우리는 이러한 질문에 명확히 대답할 수는 없다. 그러나 적어도 의식이 무의식적 신경계에 억제 신호를 제공하며, 따라서 신경계가 의식에 의해 작동된다고 신경학적으로 설명하는 것은

11) 이러한 의견에 동의하는 입장을 조지 맨들러에서 볼 수 있으며(George Mandler, 1994), 반면에 반대하여 창의성에 의식이 핵심이라는 주장을 펜로즈의 『황제의 새 마음』(Emperor's New Mind)에서 볼 수 있다(Roger Penrose, 1996).

신경학에서 상식이다. 이런 측면을 고려할 때, 의식적인 철학의 비판적 사고가 무의식적 신경망 구조에 영향을 미칠 것이라고 추론하는 것은 무리한 주장이 아니다.¹²⁾

둘째, 창의적 이론, 새로운 이론을 발견하기 위해 비판적 질문하기 이외에 요구되는 다른 것은 없는가?

새로운 이론이 탄생하기 이전에 국소대응도에 나름의 적절한 이론적 그물망이 있어야 한다. 창의적 과학 이론이 탄생하기 위해서는 비판의 대상이 되는, 즉 요동에 의해 흔들려야 할 전임 이론의 국소대응도가 있어야 한다. 그러한 측면에서 창의적 연구를 원하는 과학자는 현재 유력한 과학 이론들에 정통해야 한다. 그리고 그 이론에 기초적 핵심 개념이 무엇인지 명확히 인식할 수 있어야 한다. 그리고 난 후에 그것을 철학적으로 사고하는 태도를 가질 필요가 있다. 이러한 측면에서 전임 이론은 과학자가 새로운 이론을 창안하기 위한 자원인 셈이다.

비판적 사고가 창의적 과학 연구를 위한 방법이라는 지금까지의 신경철학적 해명으로부터 다음과 같은 의문들에 대한 우리의 이해를 확장할 수도 있겠다. 우리는 창의적 연구를 위해 왜 융합해야 하는가? 그리고 우리는 창의적이기 위해 왜 STEAM 교육을 해야 하는가? 앞서 지적했듯이, 새로운 이론을 창안하기 위해서 과학자는 비판적으로 자신의 국소대응도를 흔들 자원들을 가질 필요가 있다. 다양한 분야에 대한 공부를 통해서 이미 활용할 국소대응도를 가지고 있다는 것은 그것들로부터 새로운 국소대응도를 다시 구성할 자원을 가지고 있다는 의미이다. 그러므로 과학자가 왜 융합연구를 지향해야 하는지가 설명된다. (그러나 지금까지 논의해온 맥락에 비추어 STEAM 교육 자체가 창의성을 유도한다고 보기는 어렵다.)

결론적으로 본 연구자는 다음과 같이 주장한다. 창의적 과학 탐구를 할 소양을 위해 과학자는 철학적으로 자신의 학문적 기초 가정들을 돌아볼 줄 알아야 한다. 앞으로 한국에서도 과학자들이 과학철학의 소양을 갖추게 할 필요가 있으며, 자신들의 과학을 철학적으로 탐구할 능력을 배양해야 하는 이유가 있다. 이러

한 측면에서 본 연구는 막연히 과학철학이 과학의 교육에 필요하다는 피상적 전망을 구체적 전망으로 바꾸게 한다. 만약 앞으로 한국의 과학자들은 과학철학의 소양을 갖추어 적절한 철학적 의문을 던질 줄 알게 된다면, 그 능력은 그들에게 과학의 원천 이론(원리)의 발견으로 인도해 줄 것이다. 그러므로 앞으로 한국이 과학 분야에서 선진 국가로 상승하려면, 과학자들이 다만 전공하는 과학의 내용을 넘어 철학적 소양도 갖출 필요가 있다.

국문 요약

본 논문은 ‘창의적 과학탐구 방법으로 철학의 비판적 사고가 어떤 기능을 하는지’를 신경철학적으로 설명하려는 하나의 가설적 제안이다.

지금까지 창의적 과학연구 방법은 주로 포퍼(Popper), 쿤(Kuhn), 험펠(Hempel), 라카토슈(Lakatos) 등 과학철학자들이 제안한 과학의 논리적 ‘탐구과정’과 관련된 가설적 주장들이었다. 그러한 주장들은 어떠한 연구과정 또는 접근법이 창의성을 발휘하게 하는지를 모색하게 한다. 본 연구자는 그러한 탐구 경향 혹은 접근법을 “창의성 과정 접근법(Process Approach of Creativity: PAC)”이라 부를 것이다. 그러나 본 연구자의 관점에 따르면, PAC를 모색하는 연구자들은 실질적으로 창의적 이론이 어떻게 도출되는지에 관심을 두지 않는다.

반면에 본 논문은 서양에서 새로운 이론을 창안했던 과학자들의 ‘철학적 사고 능력’에 초점을 맞춘다. 그들은 과학 연구 이외에도 대부분 철학을 공부한 경험이 있으며, 자신의 학문에 대한 비판적 사고를 할 줄 아는 학자들이었다. 본 연구자의 관점에 따르면, 철학의 비판적 사고는 자신이 갖는(납은) 과학이론에서 핵심적 기초 개념과 원리에 대한 회의와 의문을 제기하게 하여, 새로운 창의적 이론을 얻게 한다. 본 연구는 이것을 신경철학의 관점에서 설명하려 한다.

신경철학의 창시자인 처칠랜드 부부(Paul and Patricia Churchland)의 “상태공간 표상이론(the state space theory of representation)”의 관점에서 전망해보면, “창의적 이론”이란 새로운 포괄적 설명과 예측을 제공하는 새로운 국소대응도

12) 이러한 측면에서 명시적 반성을 유도하는 비판적 사고(1) 역시 대응도들 사이의 연결망에 수정을 일으켜 (평범한) 창의성을 유도할 수 있다고 할 수 있다. 그러나 이것이 국소대응도 자체를 ‘혁신적’으로 바꿔줄 원동력은 아닐 것이다.

(topographic maps)의 연결망이다. 그 전망에서, 철학의 비판적 질문의 태도는 낯은 국소대응도 연결망의 오류를 역전파(back-propagation) 또는 피드백(feedback)으로 수정하게 할 것이며, 따라서 새로운 대응도 연결망을 탐색하게 만들 원동력이라고 본 연구자는 가정한다. 이 가정에서, 과학자들은 특별히 비범한 창의성(extraordinary creativity)을 위해 자신의 학문적 기초 가정들을 철학적으로 돌아보는 것이 중요하다. 철학의 비판적 태도는 낯은 기초 가정들의 대응도를 흔들며 과학자들이 새로운 개념체계의 국소대응도를 형성하도록 해주기 때문이다. 이러한 측면에서 본 연구자는 “창의성 비판적 사고 접근법(Critical Thinking Approach of Creativity: CTAC)”을 제안한다.

주제어: 창의성, 과학의 방법, 비판적 사고, 상태공간 표상이론, 신경철학.

참고 문헌

- 권용주, 정진수, 박윤복, 강민정 (2003). 선언적 과학지식의 생성 과정에 대한 과학철학적 연구: 귀납적, 귀추적, 연역적 과정을 중심으로. *한국과학교육학회*, 23(3), 215-228.
- 권재술 (2001). 과학 개념형성의 한 인지적 모형. *과학교육연구소*.
- 김현승 (2010). 과학의 창의성에 대한 철학적 접근: 창의성 연구와 과학적 발견의 관계를 중심으로. *과학철학*, 13(2), 117-146.
- 박제윤 (2006). 과학적 사고에 날개를 달아주는 철학의 나무. 도서출판 함께.
- 박제윤 (2007). 과학적 사고에 날개를 달아주는 철학의 나무2. 도서출판 함께.
- 백성혜 (2001). 아르키메데스는 무엇을 발견했을까?. *화학교육*, 28(4), 60-67.
- 백성혜, 이상희(2011). 과학의 본성과 과학교육: 과학자의 창의적 사고과정에 대한 이해와 교육에의 적용문제 고찰. *한국과학철학회 2011년 학술대회논문집*, 99-134.
- 백성혜, 김윤기, 홍예윤, 황신영 (2012). 기체입자 운동론에 관련된 과학자들의 창의적, 비판적 사고과정에서 나타난 과학철학적 관점의 변화가 과학교육에 주는 함의. *과학철학*, 15(1), 79-99.
- 김왕동, 성지은(2009). 창의적 인재육성의 근본적 한계와 당면과제, *과학기술정책연구원*, 32.
- 양일호, 정진수, 권용주, 정진우, 허명, 오창호 (2006). 과학자의 과학지식 생성 과정에 대한 심층 면담 연구. *한국과학교육학회*, 26(1), 88-98.
- 이경화, 성은현, 최병연, 박춘성, 전경원, 하중덕, 한순미 (2009). 초등학교 중학년의 창의성 교육 혁신 방안 연구. *창의력 교육연구*, 9(2), 35-67.
- 이상원 (2007). 패러다임과 과학의 창의성. 2007년 *한국과학철학회 발표집*, 190-198.
- 이상욱 (2010). 과학자의 창조성은 어디에서 오는가. *한양대학교과학철학교육위원회, 이공계 학생을 위한 과학기술의 철학적 이해*. 한양대학교출판부, 637-656.
- 홍성욱 (2003). 과학적 창조성, 천재를 어떻게 이해할 것인가. *계간 과학사상*, 2003 여름.
- 홍성욱, 이상욱 (2004). 뉴턴과 아인슈타인, 우리가 몰랐던 천재들의 창조성. 창비.
- Andreasen, Nancy C. (2005). *The Creative Brain: The Science of Genius*. A Plume Book.
- Baer, John (1998). The Case for Domain Specificity of Creativity. *Creativity Research Journal*, 11(2), 173-177.
- Becker, Madelle (1995). Nineteenth-Century Foundation of Creativity Research. *Creativity Research Journal*, 8(3), 219-229.
- Bak, Per (1996). *How Natural Work: The Self-organized Criticality*, (정형채, 이재우 역, 2012. 자연은 어떻게 움직이는가: 복잡계로 설명하는 자연의 원리. 한승)
- Briskman, Larry (1981). Creative Product and Creative Process in Science and Art. *Inquiry*, 23(1), 83-106.
- Bullock T. H. (1984). Comparative neuroscience holds promise for quiet revolutions. *Science*, 225, 473-478.
- Carson, Shelley (2010). *Your Creative Brain: Seven Steps to Maximize Imagination, Productivity, and Innovation in Your Life*. Harvard Health Publications: Harvard University.

Chalmers, A. F. (1978, 1982, 1999). What is This Thing Called Science?, Open Univ. Press. (신중섭 외 역, 2012. 과학이란 무엇인가?. 서광사)

Churchland, Paul M. (1989). A Neurocomputational Perspective: The Nature of Mind and the Structure of Science. Cambridge, MA: The MIT Press.

Churchland, Patricia S. (2002). Brain-Wise, Studies in Neurophilosophy. The MIT Press.

_____ (1992, 1999). The Computational Brain. Cambridge, MA: The MIT Press.

Churchland, Paul M. & Churchland, Patricia S. (2002). Neural worlds and real worlds. Nat Rev Neurosci., 3, 903-907.

Einstein, Albert (1922). The Meaning of Relativity. Princeton and Oxford: Princeton University Press. (고종숙 역, 2011. 상대성이란 무엇인가. 김영사)

Einstein, Albert (1961). Relativity: The Special and the General Theory. Translated. by Robert W. Lawson, New York: Three Rivers Press. (장현영 역, 2008. 상대성 이론: 특수 상대성 이론과 일반 상대성 이론. 지식을 만드는 지식)

Feyerabend Paul (1975, 1988, 1993). Against Method. London: NLB, Atlantic Highlands: Humanities Press. (정병훈 역, 1987. 방법의 도전, 한겨레)

Fisher, Alec (2001). Critical Thinking: An Introduction. Cambridge University Press. (최원배 역, 2010. 피셔의 비판적 사고, 서광사)

Fox, P. T. & Friston, K. J. (2012). Distributed processing: distributed function?. Neuroimage, 61, 407-426.

Gardner, H. (1993). Creating Mind: An anatomy of creativity seen through the lives of Freud, Einstein, Picasso, Stravinsky, Eliot, Graham, and Gandhi. New York: Basic. (가드너, 임재서 역, 2004. 열정과 기질: 거장들의 삶에서 밝혀낸 창조성의 조건. 북스넷.)

Godfrey-Smith, Peter (2003). An Introduction to the Philosophy of Science:

Theory and Reality. The University of Chicago Press: Chicago and London.

Hanson, Norwood Russell (1958). Patterns of Discovery: An Inquiry Into The Conceptual Foundations of Science. UK, the Press of the University of Cambridge. (송진웅 · 조숙경 역, 2007. 과학적 발견의 패턴: 과학의 개념적 기초에 대한 탐구. 사이언스북스.)

Hebb, Donald O. (1949). The Organization of Behavior: A Neuropsychological Theory. New York, Wiley.

Hudson, Donnal L. & Cohen, Maurice E. (2000). Neural Networks and Artificial Intelligence for Biomedical Engineering. New York, Institute of Electrical and Electronics Engineers.

Hawkins, Robert D., and Eric R. Kandel (1984). Steps toward a cell-biological alphabet for elementary forms of learning. In G. Lynch, J. L. McGaugh, and N. M. Weinberger, eds. (1984). 385-404.

Hempel, Carl G. (1966). Philosophy of Natural Science. Prentice-Hall, INC. (김유항 역, 1982, 과학철학. 인하대학교출판부)

Jason, G. (1989). The Logic of Discovery. New York: Peter Lang.

Kuhn, Tomas (1962, 1970). The Structure of Scientific Revolutions. 2nd ed., Chicago: University of Chicago Press. (조형 역, 과학혁명의 구조. 이화여자대학교 출판부)

Lakatos Imre (1978) The Methodology of Scientific Research Programmes. (신중섭 역, 2002. 과학적 연구 프로그램의 방법론. 대우학술총서 527, 아카넷.)

Lawson, A. E. (2001). Promoting Creative and Critical Thinking Skill in College Biology. Bioscene, 27(1), 13-24.

Mandler, G. (1994). Hypermnnesia, incubation, and mind popping: On remembering without really trying. in C. Umilita and M. Moscovitch, Attention and Performance XV. Cambridge: MIT Press.

Newton, Isaac (1687). *Mathematical Principles of Natural Philosophy*. (translaed Andrew Motte 1729. revised Florian Cajori, 1934. Sir Isaac Newton's Principia. Vol. 1, 2, The System of the World., 이무현 역, 1998. 프린키피아 1, 2, 물체들의 움직임. 교우사)

Newton, Isaac (1704). *Optics* (Commentary, Nicholas Humez., ed., Octavo, 1998. Opticks or, a treatise of the reflexions, refractions, inflexions and colours of light : also two treatises of the species and magnitude of curvilinear figures. Palo Alto, Calif.: Octavo.

Miller, A. I. (1996). *Insight of genius: imagery and creativity in science and art*. New York, NY: Copernicus.(김희봉 역, 2001. 천재성의 비밀: 과학과 예술에서의 이미지와 창조성. 사이언스 북스.)

Nickles, T. (1980). *Introductory Essay: Scientific Discovery and The Future of Philosophy of Science*. ed., in Thomas Nickles, *Scientific Discovery, Logic, And Rationality*. Dordrecht, Holland; Boston.

Penrose, Roger (1989). *Emperor's New Mind*. Oxford University Press. (박승수 역, 1996. 황제의 새 마음. 이화여자대학교출판부)

Popper, Karl (1934). *The Logic of Discovery*. (translation of *Logik der Forschung*). Hutchinson, London, 1959. (박우석 역, 1994. 과

학적 발견의 논리. 고려원)

Root-Bernstein, Robert & Michele (1999). *Sparks of Genius*. Boston, MA, Eco's Library Publisher.(박종성 역, 2007. 생각의 탄생. 에코의 서재.)

Rose, John (1972, 2001). *A Historical Introduction to the Philosophy of Science*. Oxford University Press.(최중덕 역, 1999. 과학철학의 역사, 동연총서 205. 동연)

Steptoe, A. (1998). *Genius and The Mind*. Oxford University Press.(조수철 외 역, 2008. 천재성과 마음. 학지사)

Sternberg, R. J. and Lubart. T. I. (1999). *The concept of creativity: Prospects and Paradigms*. In Sternberg, R. J. (ed.), *Handbook of Creativity*. Cambridge, U.K.; New York: Cambridge University Press.

Weisberg, R. W. (1999). *Creativity and Knowledge: A Challenge to Theories*. In Sternberg, R. J. (ed.), *Handbook of Creativity*. Cambridge, U.K.; New York: Cambridge University Press.

Weisberg, R. W. (1999). *Creativity: Understanding Innovation in Problem Solving, Science, Invention, and Arts*. Hoboken, N. J. : John Wiley & Sons.(김미선 역, 2009. 창의성: 문제 해결, 과학, 발명, 예술에서의 혁신. 시그마프레스.)

<http://joongang.joinsmsn.com/article/aid/2011/08/12/5610468.html?cloc=nnc>