뇌기반 진화적 과학 교수학습 모형의 개발

임 채 성*
서울교육대학교

Development of a Model of Brain-based Evolutionary Scientific Teaching for Learning

Lim, Chae-Seong*
Seoul National University of Education

Abstract: To derive brain-based evolutionary educational principles, this study examined the studies on the structural and functional characteristics of human brain, the biological evolution occurring between- and within-organism, and the evolutionary attributes embedded in science itself and individual scientist's scientific activities. On the basis of the core characteristics of human brain and the framework of universal Darwinism or universal selectionism consisted of generation-test-retention (g-t-r) processes, a Model of Brain-based Evolutionary Scientific Teaching for Learning (BEST-L) was developed. The model consists of three components, three steps, and assessment part. The three components are the affective (A), behavioral (B), and cognitive (C) components. Each component consists of three steps of Diversifying → Emulating (Executing, Estimating, Evaluating) → Furthering (ABC-DEF). The model is 'brain-based' in the aspect of consecutive incorporation of the affective component which is based on limbic system of human brain associated with emotions, the behavioral component which is associated with the occipital lobes performing visual processing, temporal lobes performing functions of language generation and understanding, and parietal lobes, which receive and process sensory information and execute motor activities of the body, and the cognitive component which is based on the prefrontal lobes involved in thinking, planning, judging, and problem solving. On the other hand, the model is 'evolutionary' in the aspect of proceeding according to the processes of the diversifying step to generate variants in each component, the emulating step to test and select useful or valuable things among the variants, and the furthering step to extend or apply the selected things. For three components of ABC, to reflect the importance of emotional factors as a starting point in scientific activity as well as the dominant role of limbic system relative to cortex of brain, the model emphasizes the DARWIN (Driving Affective Realm for Whole Intellectual Network) approach.

Key words: brain-based evolutionary approach, science teaching and learning model, affective domain, behavioral domain, cognitive domain, universal selectionism

Ⅰ. 서 론

인간을 비롯한 생물과 그에 관련된 현상은 주변 환경에 따라 끊임없이 다양한 방식으로 변화하고, 이러한 변화에 대한 인간의 설명 체계도 매우 다양하며 계속 변화하는 속성을 가지고 있다. 진화 이론은 변화에 관한 이론이다. 생명체 및 생명 현상과 관련된 변화를 다루는 다양한 이론 중에서 Darwin(1859)의 자연선택에 의한 진화 이론은 이제 과학적으로 확고하게 규명되어 오고 있는 이론이다. 인간의 흥미나 호기심, 신체적 · 정신적 기능, 그리고 그 산물인 다양한 기억 역시 끊임없이 변화하는 속성을 공통적으로 가지고 있기 때문에, 이들이 진화 이론으로 설명될 수 있는지 검토하고 그 핵심 원리들을 과학 교수학습 상황에 실행할 수 있는지의 여부를 고찰하여, 실행할 수 있다면 그 구체적인 방략을 모색할 필요가 있다.

Darwin(1859)은 생물의 적응에 대해 자연선택 이론(다윈주의)을 제안하여, 작고, 연속적이며, 유리한 변이가 장기간에 걸쳐 누적되는 방식으로 작용하는 선택 과정으로 종의 기원을 설명하였다. 그는 종은 환

*교신저자: 임채성(cslim@snue.ac.kr)
**2009.09.30(접수) 2009.10.08(1심통과) 2009.10.24(2심통과) 2009.11.14(최종통과)

경에 의해 부양될 수 있는 것보다 훨씬 더 많은 자손을 만들어낼 수 있으므로, 제한된 재원 때문에 개체들은 생존을 위해 지속적으로 경쟁하게 마련이라고 주장한다. 국부 환경에서 그 생물의 생존 기회를 증가시키고 결국 번식을 증가시키는 유전된 변이는 유리하므로, 그 생물은 경쟁 상황에서 선택된다. Darwin이 주장한 변형을 통한 유래(decent with modification)에 의하면, 생물계에는 약간의 변이라도 선택에 도움이 되면 그것은 자손에게 전파되고 덜 적응되게 하는 변이들을 갖는 생물들은 결국 멸종되는 강한 유전 원리가 작용한다.

Darwin은 당시의 유전학적 지식의 한계 때문에 생물의 변이 메커니즘을 구체화하지는 못했지만, Mendel식 유전(멘델주의), Darwin의 자연선택 이론의 통합과 유전학(DNA)이라는 학문 분야의 출현으로 현대의 진화적 종합(evolutionary synthesis), 즉 신다윈주의(neo-Darwinism)가 달성되었다(Dobzhansky, 1951; Gould, 1983). 이 논문에서는 진화라는 용어를 변이체 생성, 테스트 · 선택, 다음 세대로의 전달이라는 포괄적 의미로 사용한다.

Lefton, Brannon(2006)은 학습을 환경에서의 경험을 통해 개체에서 일어나는 비교적 장기적인 변화로 정의하는데, 진화 이론은 주로 생물학적 측면에 초점을 맞추고, 학습 이론의 핵심적 관심사, 즉 일생에서 경험으로 인해 개체에게서 일어나는 변화는 고려하지 않는 것처럼 보인다. 그러나 학습 이론과 진화 이론은 겉으로 보기보다 더 많이 양립가능하다. 인간이 학습하고 적응하는 속성은 진화로 생긴 선천적인 중요한 심리 메커니즘이다. 이 메커니즘은 인간이 과거를 평가하고, 미래를 예견하여 생존하는 데 도움을 준다. 진화 이론은 진화가 인간의 학습을 위한 틀을 지속적으로 설정하고, 개인은 일생에 걸쳐 주변 상황에 적응한다고 주장한다(Petrinovich, 1997). 또한, 학습은 본질적으로 뇌기능을 토대로 이루어진다. 뇌기능은 모두 현대 학습생물학을 수반하는 하나의 생물학적 과정이다. 즉, 뇌를 아이디어들을 생성하고 그 가치를 테스트하는 다윈 기계(Darwin machine)로 볼 수 있고(Calvin, 1987; Plotkin 1994), 이러한 관점은 중요한 교육적 함의들을 가지고 있으므로, 학습이 지시(instruction)에 의해서가 아니라 선택(selection)에 의해 일어난다고 생각할 수 있다(Schaverien & Cosgrove, 1999, 2000).

한편, 과학과 기술에서는 창의와 구성적 속성이 중요한 역할을 한다. 과학 활동을 자연에 존재하는 객관적 사실과 법칙을 발견하는 것이 아니라, 사회적 · 문화적 배경 속에서 과학자가 다양한 재원을 여러 가지 방식으로 이용하여 자연에 가장 부합하는 사실을 구성해내는 과정으로 보는 구성주의적 관점에서 볼 때, 과학 자체와 과학자의 과학적 활동도 다른 진화 형태와 마찬가지로 선택적 과정이다(Plotkin, 1994).

이처럼, 자연선택에 의한 진화 이론은 생물학 영역을 초월하여 신경생물학에서부터 조직 및 산업심리학, 교육심리학, 환경심리학 등과 같이 진화심리학(evolutionary psychology)의 형태로 심리학의 여러 하위 분야에 많은 영향을 미칠 뿐만 아니라, 인공지능, 기술, 법, 예술, 경제학, 수학적 추리, 정신의학, 사회학, 심지어 종교에 이르기까지 다양한 학문 영역으로 확장 · 발전되고 있다(Blute, 2002; Buss, 2007; Geary, 2002, 2007; Wilson, 2007). Cziko (1995)는 자연선택, 클론선택, 뉴런선택 원리로부터 보편 다윈주의 (선택주의) 이론(universal Darwinian(selectionist) theory)을 제안하였다.

이러한 학문적 발전은 인간의 조건을 이해하는 것 이외에도 그것을 향상시키는 것과 밀접하게 관련되어 있다. 부모의 자녀 양육에서부터 비만, 심리치료에서부터 국가간 협력과 갈등에 이르기까지 인간과 관련된 대부분의 주제에서, 진화 이론은 이전의 관점들을 통합하고 초월하는 통찰을 제공하고 있다. 물리학과 화학이 물리적 세계를 관리하는 데 중요한 만큼 진화 이론은 교육을 비롯하여 인간사를 이해하고 관리하는 데 중요한 역할을 하게 될 것이다(Buss, 2007).

인간의 뇌기능에 관해 현재까지 밝혀진 정보를 교수학습 상황에 적용하려는 다양한 연구가 국내외적으로 많이 이루어져 왔고(강호감, 1991; 권용주, 1998; 김용진, 2000; 김재영, 2000; 배진호, 1999; 신동훈, 2006; 임채성, 1992, 1997, 2005; 최선영, 1999; Caine & Caine, 1994; Jensen, 2000; Sousa, 2001; Sylwester, 1995, 2000), 앞에서 간략히 제시한 바와 같이, 인간의 뇌가 진화되어 온 과정은 물론, 뇌 내에서 일어나는 진화적 과정에 관한 과학적 연구가 매우 많이 수행되어 왔음에도 불구하고, 인간 뇌기능의 진화적 특성과 작용 원리를 토대로 과학을 효과적으로 가르칠 수 있는 방안을 시도한 연구는 없는 실정이다.

이 연구는 이론적 연구로서, 정의적, 행동적, 인지적 영역과 관련된 뇌의 구조 · 기능, 생물계에서의 개체간 진화, 면역계 기능처럼 개체내에서 일어나는 진화, 뇌에서 일어나는 진화적 과정의 하드웨어적 측면과 소포트웨어적 측면, 과학자 공동체에서 일어나는 진화적 과정과 과학자 개인 차원에서 일어나는 선택주의적 진화를 토대로 다양한 분야에서 시도되고 있는 보편 다윈주의에 관한 연구를 고찰하고, 이를 토대로 구체적인 과학 교수학습 모형을 개발하여 제시한다.

Ⅱ. 연구 방법 및 절차

인간 뇌의 핵심적인 구조적 · 기능적 특징과 과학교육의 주요 목표 영역의 관계, 새대간에 이루어지는 진화와 뇌를 비롯하여 세대내에서 이루어지는 진화적 과정, 과학 자체와 개별 과학자의 과학적 활동에 내재되어 있는 진화적 속성을 토대로, 과학 교수학습 모형을 개발하는 이 연구의 구체적인 방법과 절차는 다음과 같다.

1. 인간 뇌의 주요 구조 · 기능과 과학 교육의 주된 목표 영역인 정의적, 행동적, 인지적 영역의 관계에 관한 선행 연구를 고찰한다.
2. 세대간 시간에 걸쳐 개체간에 일어나는 진화적 과정과 면역계와 뇌 기능 등 세대내 시간에 걸쳐 개체내에서 일어나는 진화적 과정을 고찰하여 기본적인 속성들을 비교한다.
3. 개체간 진화와 개체내 진화에 공통적으로 적용되는 원리로서의 보편 선택주의가 과학과 과학자의 과학적 활동에 적용되는 측면과 속성들을 고찰한다.
4. 인간 뇌의 주요 기능과 과학교육의 주요 목표 영역의 관계, 뇌 기능의 진화적 속성, 과학계에서 이루어지는 과학과 개별 과학자의 과학적 활동에 내재되어 있는 진화적 과정을 토대로 과학 교수학습 모형을 개발한다.
5. 개발된 모형을 과학 교수학습 상황에 적용하는 구체적인 방안을 제시한다.

Ⅲ. 인간 뇌의 주요 구조 · 기능과 과학교육의 주요 목표 영역의 관계

인간 뇌의 구조 · 기능은 앞으로 밝혀질 부분이 많이 있지만, 학교 현장에서 효과적인 과학 교수학습 방법을 모색하기에 충분한 정도의 정보가 이미 축적되었다. 이러한 측면에서 최근에 활발하게 연구되고 있는 뇌기반학습(brain-based learning) 접근법은 많은 적용잠재력을 가지고 있다. 인간의 뇌에 관한 정보는 매우 방대하므로, 여기에서는 과학교육의 주요 목표 영역(과학태도, 과학탐구기능, 과학지식)과 관련되는 핵심 내용만을 살펴본다.

여러 종의 뇌는 계통발생이라는 거시적 측면에서 볼 때, 진화적으로 대뇌의 상대적 크기가 증가하는 일반적인 경향성을 보인다. 그런데, 대뇌는 척수가 있는 뒤쪽보다 비어 있는 앞쪽으로 증대되는 방식으로 커진다. 개체발생적 측면에서 태아의 뇌 발달도 이와 유사한 패턴을 보인다(Striedter, 2005).

오랜 기간에 걸쳐 인간의 뇌 구성에 대해 다양한 환원주의적 모델이 제안되었는데, 초기에는 전체뇌(holistic brain)라는 아이디어가 제기되었고, 이후에 좌우 대뇌 반구 이론이 제기되었다. 그 다음에는 생존, 감성, 이성적 기능을 처리하도록 진화한 세 개의 층으로 된 위계적 뇌라는 MacLean(1978, 1990)의 삼위일체 뇌(triune brain) 모델이 큰 관심을 끌었다. 좀 더 최근에는 Gardner(1983, 1999)가 인간의 의식적 뇌는 각기 다른 뇌 부위에서 처리되는 8가지 지능(언어적, 논리적, 공간적, 신체운동감각적, 음악적, 대인간, 개인내, 박물적 지능)의 형태를 통해 기능한다고 주장하였다. Gazzaniga(1985)는 이러한 환원주의적 패턴을 지속적으로 견지하여 인간의 뇌는 방대한 수의 모듈이 상호연결된 반자동적인 뉴런망으로 나누어진다고 주장하였다. 각각의 모듈은 분화되어, 안면재인의 특정한 측면과 같이 제한된 인지 기능을 수행하며, 모듈 집단들이 각자의 활동들을 통합하여 더 복잡한 인지 기능들을 처리한다.

MacLean의 삼위일체 뇌 모델은 단순하고 명료하여 이해하기 쉽기 때문에, 널리 사용되어 왔다. 특히, 교육 분야에서 많이 사용되어 왔다. 〈그림 1〉은 본 연구자가 인간 뇌의 주요 구조와 위치 및 대표적인 기능을 종합하여 MacLean의 삼위일체 뇌 모델로 나타낸 것이다.

이 이론에 의하면, 인간의 뇌는 오랜 기간에 걸쳐 진화하였고, R-복합체(뇌간), 대뇌변연계, 신피질이라는 세 부위는 다양한 기능을 가지고 있다. R-복합체(R-complex)는 약 2억 여 년 전에 진화한 것으로, 파충류의 뇌에서 우세한 뇌간(brain stem)과 소뇌

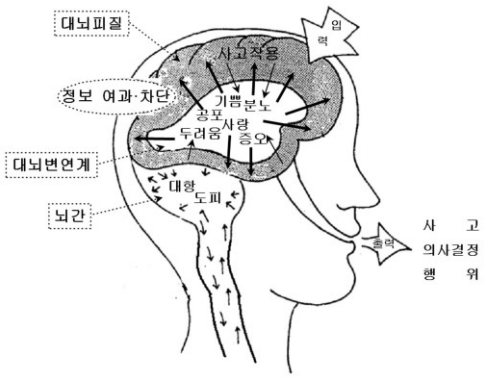

그림 1 *삼위일체 뇌의 구조와 작용*

(cerebellum)로 구성되어 있기 때문에 파충류뇌(reptilian brain)라고 부르기도 한다. 이 뇌 부위는 주로 직접적 자극에 반응하여 근육을 통제하고, 호흡, 심장박동, 신체 균형과 자동적 기능들을 조절한다. 대뇌변연계(limbic system)는 구포유류뇌(old mammalian brain)라고도 하는데, 뇌간 바로 위에 위치하고 약 6천만 년 전에 진화되어, 감성적 생활과 신체적 안전을 조절하는 일을 돕는 시상(thalamus), 중요한 단기 경험을 장기기억으로 전환시키는 해마(hippocampus), 자극들이 잠재적 위험의 원천인지의 여부를 결정하는 식으로 감성적 처리를 담당하는 편도체(amygdala)로 구성된다. 혈액 공급의 중요성에 비추어 볼 때, 대뇌변연계는 전 신체 중 혈액 공급이 매우 많은 곳 중 하나다. 신경세포 수준에서, 뇌의 전체 크기에 비해 상대적으로 작은 감성 중추에서 크기가 큰 논리적·이성적 피질 중추들로 뻗은 신경섬유(<그림 1>에서 대뇌변연계와 대뇌피질 사이의 굵은 화살표)는 그 반대 방향으로 뻗은 신경섬유(가는 화살표)보다 훨씬 더 많으므로, 감성이 뇌의 논리적·이성적 과정보다 인간의 행동에 더 강력한 영향을 미치는 경우가 많다(Armony & LeDoux, 2000; Damasio, 1994; Gazzaniga, Ivry, & Mangun, 1998; Goleman, 1995; LeDoux, 1994, 1996, 2000; Panksepp, 1998; Sylwester, 1995, 2000). 즉, 뇌의 정보처리에서 감성이 더 먼저 크게 작용하고 이성이 나중에 작용한다. 매우 위협적이거나 화가 치밀어 있는 부정적 감성 상태에서 할 말을 잃거나 아무런 생각이 나지 않는 현상은 뇌의 이러한 신경적 배열 상태 및 대뇌변연계의 정보 여과·차단 기능과 관련된다. 신피질(neocortex)은 수백만 년 전에 진화하였고 대뇌피질(cerebral cortex), 혹은 대뇌(cerebrum)라고도 하며, 고등 포유류의 뇌에서 발견되기 때문에 신포유류뇌(new mammalian brain)라고 하기도 한다. 신피질은 다양한 감각 정보의 처리, 고차 사고 기능, 추론, 언어, 문제해결 등 주로 지능적 활동을 관장한다(Sylwester, 1995, 2000).

인간은 자신이 처한 상황에 따라 이러한 기능들을 기초적인 생존기능을 주로 담당하는 뇌간이나 대뇌변연계로 하향변환(구뇌지향; downshift)시키거나 사고기능과 관련된 대뇌피질로 상향변환(신뇌지향; upshift)시킨다(Caine & Caine, 1994). 학교의 과학 교수학습 상황에서 학생의 급작스런 감성적·인지적 변환은 이러한 변환 과정으로 설명될 수 있다. 삼위일체뇌 이론으로 볼 때, 대뇌변연계는 교육 분야의 정의적 영역, 신피질의 감각령·운동령·언어령은 심체적·행동적 영역, 전두엽연합령은 인지적 영역과 밀접하게 관련된다(임채성, 2005).

Ⅳ. 생물학적 진화

1. 세대간 시간에 걸쳐 개체간에 일어나는 진화적 과정

Darwin(1859)은 [종의 기원]에서 다음과 같이 5가지 이론들을 제안하였다(Mayr, 1982). (1) 세계는 일정하게 고정적이지 않고, 지속적인 진화 과정의 산물이다. (2) 모든 생물은 공통 조상으로부터 유래하였다. (3) 이러한 생물 계통은 그러한 공통 조상으로부터 지속적이고 점진적인 방식으로 분기되는 과정을 통해 일어난다. (4) 개체군은 지리적 다양성과 종 사이의 모든 중간 매개 등급을 허용하는 종분화의 원천이다. (5) 진화는 자연선택에 의해 일어난다. 그의 진화 이론은 그 위력에도 불구하고, 당대 사람들의 가치관, 이 이론을 보강해주는 메커니즘의 결여, 다윈의 다소 난해한 설명 등으로 인해 즉각적으로 수용되지는 않았다. 그러나, 신다윈주의 종합에서, 유전적 변이가 많은 개체군이 생성되고, 나중에 이 변이체들 중 일부가 선택되어 특정 개체가 생식가능기까지 생존한다는 설명체계가 구축되었다(Dawkins, 1976).

대부분의 생물 종과 그들이 사는 특정 환경 사이에 존재하는 놀라운 적합성을 자주 볼 수 있는데, Waddington(1977)은 생물이 환경적 변화에 어떻게 대처하는가라는 본질적인 질문을 제기하였다.

Plotkin(1994)은 이 질문에 대한 답이 불확실한 미래 문제(uncertain futures problem)를 해결하는 능력에서 온다고 보고, 변화의 본질 및 유전적 발달과 관련된 g-t-r 휴리스틱(genetic developmental g-t-r heuristic)이라는 매개체, 즉 1차 휴리스틱을 통해 유전자와 발생 과정을 경유해서만 생물에게 정보를 제공하는 원리를 제시하였다. 여기에서, g(generation)는 돌연변이와 성 세포를 형성하는 동안 염색체의 독립적 분리와 같이 다양한 메커니즘뿐만 아니라, 후성작용(epigenesis)의 다양한 산물에 의해 변이가 생성되는 단계이다. t(test)는 유전자 풀로 피드백되어 후속 세대로 전파될 변이체를 결정하는 선택 단계이다. r(reproduction)은 변이 형태들을 더 만들어내는 재생 단계로서, 이 중 일부는 이전에 생성된 변이체들이 보존된 형태들이고 일부는 돌연변이, 유전자와 염색체의 새로운 조합, 새로운 발생 경로를 포함하여 항존하는 변이생성 메커니즘들에서 기인하는 새로운 형태들이다.

Plotkin(1994)은 1차 휴리스틱의 두 가지 특징을 다음과 같이 설명한다. 하나는 과거에 유효했던 것을 미래로 일반화하는 귀납 논리 형태를 취한다. 즉, 성공적인 변이체는 유전자 풀로 피드백되어 미래의 개체들을 만드는 데 기여할 수 있다. 이것은 이 휴리스틱의 보존적 · 실용적인 부분이다. 또다른 한 가지 특징은 근원적 · 창안적 요소로서 우연한 과정에 의해 새로운 변이체를 생성하는 것이다. 이것은 새로운 변이체를 시스템 질서에 주입함으로써, 세계가 변하여 과거에는 유용했던 것이 더 이상 유효하지 않게 되어 생길 수 있는 결함을 벌충하는 자연의 방식이다. 변화는 세계의 보편적 조건이고, 진화는 이러한 변화에 대한 대응이므로, 진화의 원천인 변화의 본질을 파악하기 위해서, 예측될 수 있는 변화와 예측될 수 없는 변화로 나누어 고찰할 필요가 있다.

운석 충돌, 지진, 새로운 병원균의 갑작스런 창궐 등 변화를 예측할 수 없는 경우에는, 생명 시스템들은 1차 휴리스틱의 변화나 근원적 요소로 이러한 변화에 대처할 수밖에 없다. 우연히 그러한 환경에 적합한 특성을 가지고 있는 개체는 생존하고 그렇지 않은 개체는 생존하지 못한다. 한편, 온도와 광도의 주기적 변화뿐만 아니라 그에 관련된 여러 가지 변화와 같이 변화가 예측가능한 경우에도, 경험을 통해 그러한 변화를 알 수 있는 인간 이외의 다른 어떤 단일 개체의 인지적 역량을 벗어나는 생존 지식이 진화할 수 있도록 해주는 것은 유전자 풀, 즉 예측자인 1차 휴리스틱을 통해 획득된 전체 개체군의 축적된 유전적 지식에 있다. 그러므로 예측가능한 변화는 1차 휴리스틱 과정들이 미래에 그러한 변화에 대처하게 하는 적응을 제공하는 유전 정보를 축적할 수 있도록 과거에 충분한 빈도로 일어난 변화를 의미한다. 인간은 과학적 지식을 통해 그러한 주기들에 실제로 정확하고 반복적인 특징들이 포함되어 있음을 안다. 그러나 그 주기는 예측가능하지만 세부사항들은 매우 방대하므로 국부적 관찰자는 실제로 이들을 다소 불안정적으로 경험한다. 이러한 예측가능한 비예측성(predictable unpredictability)은 지능이나 이성이 진화한 이유를 이해하기 위한 토대이다(Plotkin, 1994).

2. 세대내 시간에 걸쳐 개체내에서 일어나는 진화적 과정

1) 면역계에서 일어나는 진화적 과정

자연선택에 의한 생물학적 진화가 개체 사이에서뿐만 아니라 개체내에서도 일어날 수 있는가? 면역계, 특히 항체들이 어떻게 거의 모든 항원에 반응하여 생성될 수 있고, 나중에 이 항원에 다시 노출되면 이러한 반응이 더 향상되는가? 항체의 생성과 다양성에 관한 면역학의 문제는 다윈적 원리들에 토대를 둔 Jerne(1955)의 항체형성 이론을 Burnet(1957)이 개정한 클론선택 이론(clonal selection theory)으로 잘 설명된다.

Jerne(1955), Burnet(1957), Talmage(1959)의 연구가 있기 이전에는 Pauling(1940)이 제시한 획득면역의 주형 이론(template theory of acquired immunity)이 항체 다양성에 대한 보편적 이론이었다. 이 이론은 모든 항체 분자는 똑같고, 항체 생성 세포 내부에서 항원과의 상호작용을 통해, 항체가 항원 형태에 대한 정보를 받아, 사실상 항체생성 세포가 항원을 항체 형태에 대한 주형으로 사용한다고 주장하였다. Jerne(1955)은 이러한 주형 이론의 여러 가지 문제점을 해결하기 위해 다윈의 자연선택 이론에 기반한 접근법을 주장하였다. 그의 이론은 숙주가 항원에 의해 선택되도록 경쟁하는 선천적으로 다양한 항체 분자군을 소유하고 있다고 주장한다. 항원-항체 복합체가 선택된 것과 똑같은 항체를 더 많이 만드는 과정을 촉

발시킨다. 이 항체들은 약간의 변이를 가지고 있다. 자기항원(자기면역)에 의해 선택된 항체는 부적으로 선택되어 그 집단에서 제거된다.

Burnet(1957)은 Jerne의 선택주의 이론을 확장한 클론 선택 이론에서 항체 분자가 아닌 임파구(면역세포)가 항원에 의한 선택의 단위로서, 변이를 갖는 그 세포를 활성화, 즉 반응 장소에 있는 세포로서 똑같은 특이성을 갖는 항체를 방출시키고 증식시킨다고 주장하였다.

이 이론은 항체의 다양성을 설명하기 위해 제안되었지만, 면역학의 발달로 이 이론의 적용가능성이 확장되어, 항체를 생산하는 B-임파구와 B 세포를 돕고 감염된 세포를 죽이는 역할을 하는 T-임파구 모두에 적용된다. Burnet이나 Talmage는 변이의 구체적인 메커니즘을 제시하지는 않았지만, 나중에 Tonegawa *et al.*(1974)은 자손 세포의 유전기반 초돌연변이(genetic-based hypermutation)에 의해 일어남을 발견하였다. 이 클론 선택 이론은 과학적으로 잘 규명된 이론 중 하나로서 세대내 시간 동안에 개체내에서 g-t-r 휴리스틱에 의해 일어나는 대표적인 진화적 과정이라고 할 수 있다.

한편, 세대간에 일어나는 생물의 변환(진화, 계통발생, 계통발생적 변화)과 한 세대내에서 일어나는 생물의 변환(발생, 개체발생, 개체발생적 변화)의 관계를 다루는 학문분야로서 이보-디보(Evo-devo)가 탄생하여 활발히 연구되고 있다(Bowler, 1996; Gould, 1977; Hall, 1992, 1999).

이처럼 Darwin의 자연선택에 의한 진화 이론은 선택주의 이론의 원형으로서, 면역계에서 항체 다양성에 대한 클론선택 이론과 다음 소절에서 다룰 신경학 분야에서 Edelman(1981, 1987)의 신경집단 선택 이론(neuronal group selection theory) 등을 비롯하여 다양한 선택주의 이론들을 야기하였다.

2) 뇌에서 일어나는 진화적 과정

(1) 하드웨어적 측면

뇌 기능에 대해서는 선택주의적 이론을 비롯하여 이론들이 매우 많다(Changeux, 1997). 자연선택 이론과 클론선택 이론에 토대를 둔 Edelman(1981, 1987, 1992)의 신경 다윈주의(Neural Darwinism) 혹은 신경집단 선택 이론(theory of neural group selection)은 뇌에서 다중으로 연결되고 분산된 뉴런 집단에서 이미 존재하는 구조적 차이들이 기능을 토대로 집단을 선택하여, 결국 적응의 토대를 제공한다고 주장한다. Edelman은 신경계가 어떻게 자기조직화하여 정보를 저장하고 새로운 행동 패턴을 창출할 수 있는가를 기술한다. 이 이론에 의하면, 뇌 내에는 발달적 선택(developmental selection), 경험적 선택(experiential selection), 재입력(re-entry)이라는 선택에 관련된 세 가지 주요 상호작용적 과정이 있고 개인은 이 과정을 통해 학습한다.

첫 번째 과정은 세포를 조직화하고 연결하는 물리적 과정, 즉 신경망 형태(1차 레퍼터리; primary repertoire)가 발달하는 과정으로, 주로 배 발생과 출생후 발달 시기에 일어나고, 이 기간에 인접한 뉴런들이 다양한 크기와 구조로 집합적으로 강하게 상호연결되어 신경집단을 이룬다. 이것 때문에, 뉴런들이 분지하여 수백만의 연결들을 구축하는 과정인 뇌 발달은 유전자에 의해 설정된 범위 내에서 각 개인마다 고유한 경로를 따른다. 발달 과정에서 만들어질 수 있는 수십 억 개의 상호연결들 중에서, 특별한 것들이 선택되어 신경집단 혹은 신경 회로들로 이루어지는 1차 레퍼터리를 구축한다.

두 번째 과정은 동물이 활동할 때 사용됨에 따라 신경망에 있는 연결 비중, 즉 시냅스 강도의 변화라는 2차 레퍼터리 구축을 통해 일어나는데, 이 과정에서 적응적 행동을 야기하는 신경 집단들의 상관된 반응들이 선택된다. 세포 사망(cell death)과 시냅스 전지(synaptic pruning)는 물론 뉴런과 시냅스의 과잉발현(over-expression; Hutterlocher, 1990)은 부분적으로 경험에 의해 구동되는 활동의존적 경쟁과 선택 원리(Quartz & Sejnowski, 1997)와 관련된다. 일단 개인의 1차 레퍼터리가 형성되면, 그 개인이 경험하는 과정 동안에 기능성 신경 집단들의 특정 패턴이 다른 패턴보다 더 선호되거나 선택된다. 이러한 선택은 특정 행동의 가치에 따라 이루어지고, 그 결과로 그 행동을 구성하는 시냅스 연결들이 강화된다. Edelman(1993)은 통계적으로 발생 가능성이 증가된 이러한 행동들의 세트를 개인의 2차 레퍼터리라고 하였다.

선택의 세 번째 과정인 재입력 과정은 처음 두 과정을 통해 구축된 신경 활동의 지도들을 상관시키고 조화시키는 역할을 하는 순환적 연결들을 만든다. 유사한 환경 상황들이 반복될 때 선호되는 이러한 신경 집

단들이 적응적 행동을 야기하기 위해서는, 감각 수용기와 함께 공간적 · 시간적으로 서로 연결되어야 한다. 이는 신경 집단들 안에서와 그들 사이에 다수의 지속적인 분산 · 병렬의 양방향 반복 연결들이 구축된 3차(고차) 선택 과정을 통해 수행된다. 이런 식으로, 예를 들어 똑같은 지각 자극과 관련된 신경 집단 활동의 다양한 패턴이 연결될 수 있고, 그에 따라 구성 · 재구성된 행동들에 새로운 가치가 부여될 수 있다.

학습에 대한 신경 집단 활동 수준에서의 이러한 신경과학적 설명은 환경을 개인의 행동들에 선택압을 가하는 것으로 묘사한다. 이렇게 보면, 학습은 다양한 행동 변이체들 중에서 가치 요구조건에 부합되는 것들을 선택하여 적응적 행동들을 생성 · 재생성하는 과정으로서, Plotkin(1994)의 g-t-r 휴리스틱으로 잘 요약된다.

한편, Adams(1998)는 생물학사에서 Darwin (1859)의 [종의 기원(On the Origin of Species)]과 Hebb(1949)의 [행동의 조직(The Organization of Behavior)]을 가장 영향력 있는 두 저서라고 주장하며, 각 저서의 핵심 아이디어는 개체간에 일어나는 진화적 과정과 개체내 뇌에서 일어나는 진화적 과정이 유리한 변이체를 선택하는 초순환적 자기촉매(hypercyclic autocatalysis)로서 똑같다는 Hebb-Darwin 알고리즘이라고 주장한다. 즉, 어떤 반응의 산물이 그 반응의 촉매로 작용하는 자기촉매적 속성과 유전자와 단백질이 서로의 복제를 돕는 것과 같은 초순환적 속성을 가지고 있다고 주장한다. 시냅스는 양자적으로 강화하는 방식으로 복제하고, 새로운 신경세포들을 연결하는 방식으로 돌연변이한다. 시냅스는 전시냅스와 후시냅스 발화를 연관시키는 방식으로 번역 작용을 수행한다. 더욱이, 이러한 작용의 산물, 즉 Hebb의 규칙에 의한 공동발화(conjoint firing)는 복제가 일어나게 한다. 그 결과로 변이체들이 선택되고 연결 패턴들이 자동적으로 최적 배열을 취하게 된다.

뇌와 생물종이 지속적으로 변화하는 환경에 효율적으로 적응할 수 있는 것은 바로 이러한 Hebb-Darwin 알고리즘이 매우 강력하기 때문이다. 이 알고리즘은 생물학의 근본 단위인 유전자와 신경생물학의 근본 단위인 시냅스로 명확하게 설명될 수 있다. 이들 두 과학 영역 각각에는 고차 수준과 하위 수준의 존재들(뉴클레오티드, 염색체, 유전체, 개체군 등; 채널, 뉴런, 회로 등)이 있지만, 유전자와 시냅스가 복제, 돌연변이, 선택의 단위이다. Adams(1998)가 제안한 이러한 시냅스 다윈주의(synaptic Darwinism)는 Edelman(1987)이 제안한 틀, 즉 선택의 단위를 신경집단으로 보고 변이체의 레퍼터리가 지속적으로 생성되지 않는 틀과는 근본적으로 다르지만, 이들은 공통적으로 뇌의 발달과 기능을 개체내에서 일어나는 진화적 과정으로 설명한다.

(2) 소프트웨어적 측면

진화인식론(evolutionary epistemology; Campbell, 1974)과 신경과학에서 신경선택에 대한 철학과 이론들(Adams, 1998; Dehaene et al., 1987; Edelman, 1987)처럼 학습 이론에서 진화의 원리들을 사용하려는 시도가 많이 이루어지고 있다. 신경과학 분야에서는 이 이론들이 현재까지 적응 행동의 시뮬레이션 분야만큼 널리 받아들여지지는 않았다. 한편, 진화적 알고리즘을 다양한 분야의 적응 행동에 적용하여 거둔 성공(Beer, 2000; Harvey *et al.*, 1997, 2005; Nolfi & Floreano, 2000; Pfeifer & Scheier, 1999)은 진화적 접근법이 개체 학습에 대한 새로운 알고리즘을 개발하는 데 많은 잠재력을 가지고 있음을 시사한다.

생물학적 관점에서, 학습은 그것을 구동하는 가치들을 진화적 시간에 걸쳐 개체의 생존 가능성을 증가시키는 방식으로 생물에 구축되어 온 것이라고 볼 수 있다. 이제 시간이 경과하면서 선택주의적(g-t-r) 휴리스틱도 생물의 뇌 내에서 진화하였다는 더 강력한 주장이 제기되고 있다(Plotkin, 1994). 이는 생물의 뇌가 변이체들을 생성하고 가치에 따라 그것들을 선택할 수 있는 능력을 진화시켰다는 의미이다(Gazzaniga, 1992).

학습에 대한 이러한 관점은 고유한 개체들로 이루어진 개체군 내에서 종의 중요한 특징 중 하나인 적응적 행동을 잘 설명한다. 더욱이, 자기 종의 진화 결과와 빠르게 변화하고 예측불가능한 환경에서 개인의 고유한 경험의 결과로 개인들이 어떻게 이러한 적응적 행동을 발달시키는가를 설명한다. 개체간 변이와 기회주의적 상황은 선택이 이루어질 수 있는 풍부한 토대를 제공한다는 측면에서 중요하다(Edelman, 1992).

그러므로, 지능을 통해 변이체의 비예측적 생성을 수반하는 뇌-학습에 대한 선택주의적 설명을 고려할 때, 지능적인 개인은 자기 행동의 원인들을 생성할 수

있다. 그리고, 어떤 종에서 지능이 일단 진화하고 나면, 그 후에는 뇌가 유전자와 동등한 원인력을 갖게 된다(Plotkin, 1994).

Langs(1996a, b)는 심리분석 이론과 진화 이론들의 통합을 시도하면서, 정보를 처리하는 마음은 자연선택에 의해 진화한 한 적응 기관이라고 주장한다. 이러한 정신 모듈의 현재의 적응과 작용 원리들은 다윈적 진화 원리들의 적응적 존재들과 직면 상황들에서 이 기능들의 광범위한 적용가능성에서 나온다.

Langs(1996a)는 관련 연구를 종합하여, 정보처리 장치로서의 뇌는 시간이 경과함에 따라 다윈적 진화 원리와 일치되게 진화해왔을 뿐만 아니라, 인지적 모듈로서의 마음도 중요한 측면들에서 이 원리들과 일치되는 방식으로 작용하고 적응한다고 주장한다. 전체적인 정보처리 장치로서의 뇌와 이것의 심층적인 무의식 시스템은 거의 전적으로 환경이 이미 구축되어 가용한 내부 재원으로부터 선택하는 선택주의적 규칙과 원리들에 따라 기능한다. 뇌의 의식적 시스템은 표면적으로는 환경이 이 시스템의 작용을 지시하는 지시주의적 형태를 따르는 것처럼 보이지만 심층적으로는 선택주의 형태에 따라 작용한다.

한편, Sweller(2003, 2004, 2006)는 자연적 정보처리 시스템(natural information processing system)의 두 가지 예로 자연선택에 의한 진화와 인간의 인지구조를 비교 · 조사하였다. 그는 생물학적 진화 및 인간의 인지와 같은 자연적 정보처리 시스템은 자연적 존재들의 활동을 지배하는 데 사용되는 정보를 조직화한다고 보고, 생물학적으로 2차적인 정보를 처리하여 후천적 지식을 획득할 때, 이 시스템들은 자연적 정보처리 시스템의 근저에 깔려 있다고 제안되는 5가지 공통적인 원리, 즉 (1) 생물의 유전체(genome)와 인간의 장기기억(long-term memory), (2) 생물학적 번식과 다른 인간으로부터의 학습, (3) 유전자의 무작위적 돌연변이와 아이디어의 무작위적 생성 · 테스트, (4) 환경 정보를 관리하는 후성적 시스템과 새로운 정보를 처리할 때의 작용기억, (5) 유전체 정보를 관리하는 후성적 시스템과 장기 작용기억(long-term working memory)을 동등시하여 자연선택에 의한 진화에서 사용되는 과정들이 인간의 인지 시스템에서 일어나는 과정들과 매우 유사함을 강조하였다.

Sweller에 의하면, 자연선택에 의한 진화는 무한히 지속되는 방대한 유전정보의 저장소, 작은 무작위 변이, 그러한 변이의 유효성을 검증하는 과정을 수반한다. 인간의 인지구조 역시 인지적 활동들을 조화시키는 장기기억 형태의 방대한 정보 저장소와 장기기억에 작은 변화를 일으키는 제한된 작용기억을 포함하고 있다. 유전체가 종의 생물학적 특징들을 결정하는 것과 유사하게 장기기억은 행동 패턴, 전문성 등과 같은 개인의 인지적 특징들을 결정한다. 유전암호와 장기기억에 들어 있는 정보는 각각 생물학적 시스템과 인지적 시스템의 행동을 안내한다.

또한, 정보를 새로운 방식으로 조화시키는 상황들에 직면했을 때 자연선택에 의한 진화와 인간의 인지구조 모두 무작위성에 의존하여 작용한다. 이 두 시스템이 익숙한 정보를 처리할 때에는, 매우 효과적인 실행 안내장치인 유전체와 장기기억으로 가능하다. 변화된 새로운 환경으로 인해 생물학적 활동의 변화가 요구될 경우에는, 무작위 돌연변이와 그것의 유효성 검증(자연선택)이 유일하게 가용한 메커니즘이다. 마찬가지로, 새로운 인지적 상황을 다룰 때에는 작용기억 상에서의 무작위 탐색 과정이 활용된다. 새로운 정보를 조직화할 때 장기기억에서 지식 구조들이 가용하지 않으면, 학습자는 무작위 조합들을 시도하고 그들의 유효성을 검증한다. 요소들의 수가 증가함에 따라, 가능한 조합의 수가 기하급수적으로 증가하는 조합 폭증(combinatorial explosion) 현상이 나타난다. 그러므로, 요소들을 무작위로 조합해야 한다면, 어느 순간에 고려할 수 있는 조합의 수는 제한될 수밖에 없다. 새로운 정보를 다룰 때 작용기억의 용량이 심하게 제한되는 또다른 진화적 이유는 이러한 제한들이 장기기억 각각의 변화를 적게 해준다는 점이다. 복합적인 생물학적 기능들은 수백만 년에 걸쳐 진화하였으므로 유전체 상에서 무작위적 변화가 많이 일어나면 그 개체의 생존 가능성이 매우 낮아지기 때문에 유전체 상에서 일어나는 개별적인 변화들도 적다(Sweller, 2003; 2004).

Sweller(2003)는 이러한 유사성들을 토대로 인간의 인지구조가 인간의 다른 모든 형질과 같은 방식으로 진화하였으므로, 질적으로 유사한 특성들을 갖는다고 주장한다. 즉, 그는 자연선택에 의한 진화와 인지구조에 공통적인 이 5가지 원리는 인간의 학습과 사고의 본질에 대해 하나의 통합적 관점을 제공한다고 주장하면서, 교수학습 상황에서의 정보 제시와 관

련된 함의들을 구체적으로 논의하였다. 그러나 그는 주로 인지적 측면에 초점을 맞추고, 과학적 방법과 관련된 측면은 부분적으로 다루었지만, 정의적 영역은 다루지 않았다.

진화인식론자는 뇌가 마치 다윈 기계처럼 작용한다고 본다. 즉, 학습 과정과 지능의 작용을 통해 세대내 시간에 걸쳐 일어나는 뇌와 심리적 상태의 변환은 뇌 내에서 일어나는 진화적 과정의 결과라고 믿는다. 다시 말해, 학습과 지능은 뇌 메커니즘에서 구체화되는 진화적 과정들이다. 이는 일반적 의미의 진화에서 생물 사이에 작용하는 진화적 과정이 인간의 뇌 속에서 작용하는 것과 똑같다는 의미이다. Campbell(1974)은 개체간(inter-organism)과 개체내(intra-organism)에 이루어지는 진화적 과정을 모두 포괄하는 일반적인 단순 도식으로 맹목변이-선택파지(blind-variation-selective retention; BVSR) 과정이라는 일단의 원리들을 주장하였다. Lewontin(1970)의 세 가지 원리들과 몇 가지 불일치되는 점이 있기는 하지만, Campbell이 제안한 전체적인 과정을 이루는 세 가지 필수 요소들은 Lewontin의 것과 유사하다. 이들은 변이를 도입하는 메커니즘(Lewontin이 제안한 표현형 변이), 일관된 선택 과정(Lewontin이 제안한 차등적 적합도와 그것의 유전의 조합), 선택된 변이체를 보존하거나 전파시키는 메커니즘이다.

개체의 번식을 차등화하는 것과 똑같은 힘과 규칙들이 그들의 내면에 존재하는 적응적 재원들도 차등적으로 증식시킨다. 그러므로, 경쟁하는 개체와 그 종들의 장기적 발달과 관련된 원리들은 이들의 뇌에서 일어나는 하드웨어적 측면 뿐만 아니라, 기능, 즉 소프트웨어적 측면들에도 똑같이 적용된다. 두 과정 모두 '변이 → 테스트와 선택 → 차등적 번식 → 적응 → 새로운 변이체의 도입 → 이 과정의 반복' 과정을 따른다.

이 원리들은 다음과 같이 일단의 규칙과 제약조건들로 작용하여 정신 다윈주의(mental Darwinism)의 필수적 원리들을 창출한다(Langs, 1996b).

1. 정보처리 시스템으로서의 인간 뇌는 주로 우연한 변이체를 토대로 유전적으로 결정되는 선천적 구조나 속성들을 가지고 있다는 측면에서 빈 서판이 아니다. 이들은 유전되는데 자연선택이라는 다윈적 여과장치를 통해 유효성에 따라 이전 테스트 시기들 동안에 선택되었기 때문에 현존한다.
2. 기존 변이체들 사이에 적응적 성공을 위한 경쟁이 일어난다.
3. 환경적 사건들에 의해 적응과 생존 측면에서 직면 상황에 가장 성공적인 변이체들의 번식을 유리하게 하는 선택이 일어난다. 광범위하게 수용되는 이 원리들 이외에, 내부 재원의 혁신적 조합의 선택과 이 재원의 자기조직화를 통해 전례없는 새로운 조합이 창발되는 과정을 통해 환경적 자극에 대한 창의적인 내부 반응을 야기하는 과정도 포함된다(Kauffman, 1995).
4. 일단의 새로운 상황과 선택된 변이체들이 이러한 진화적 사이클을 반복한다.

지금까지 고찰한 내용, 특히 학습을 학습자의 가치를 충족시키는 행동의 적응적 변화로 보는 진화적 관점(Edelman, 1992)과 학습의 생물학적 특징들(Schaverien & Cosgrove, 1992, 2000)을 토대로, 본 연구자는 인간의 뇌에서 일어나는 학습을 학습자의 가치와 요구를 토대로 흥미, 기능, 지식 영역에서 다양한 변이체를 생성 · 테스트하여 유용한 것을 선택 · 파지하는 발달적 · 후성적 과정이라고 정의한다.

Ⅴ. 과학의 진화

1. 과학의 진화적 속성

과학적 방법을 일반적 탐구 형태로 이해할 때, 과학적 방법과 인간의 뇌 사이에는 진화적 속성 측면에서 중요한 구조적 유사점들이 존재한다. 즉, 문화로서의 과학계에서 개체적 진화가 일어나게 하여 과학 자체가 진화하게 하는 방식으로 과학을 생각할 수 있다(Hull, 1988).

인간과 인간이 만든 산물은 생물학적 진화로부터 도출되므로, 과학도 인간의 기원을 반영하는 특징을 가지고 있다고 볼 수 있다. 생물학적 진화가 가능한 생물 형태의 개방적 생성 · 검증인 것처럼, 과학 역시 인간과 우주의 관계에 대한 가능한 이해의 개방적 생성 · 검증이다. 이들은 모두 시작 때에는 단일한 의도나 계획이 없고, 고안된 목표나 최종 상태 없이 지속된다. 둘 모두 과정 자체의 결과와 무관한 최종 상태의 존재에 구속되지 않고 유효한 것을 검증하는 방식으로 진행된다. 이 둘의 핵심적 특징은 이전의 생성 · 검증을 반영하여 새로운 가능성들을 반복해서 생성 ·

검증하는 과정으로 이루어지는 피드백 루프라는 점이다. 과학은 획득된 경험들을 비교하여 미래 탐색을 위한 새로운 가능성을 창출한다는 측면에서 생물학적 진화의 핵심 원리들에 의해 진행된다고 할 수 있다(Grobstein, 2005; Hull, 1988).

인간의 뇌는 진화의 산물인 동시에 과학의 원천이기도 하므로, 이 양자는 구조적 유사점들을 가지고 있다. 앞 소절에서 고찰한 바와 같이, 뇌는 환경을 분석하고 그로부터 학습하는 장치로 간주되는 경우가 많은데, 사실은 결과를 생성하고 그 효과를 관찰함으로써 진화와 과학이 하는 것과 매우 흡사한 방식으로 탐색하도록 진화에 의해 설계된다. 이러한 탐색은 항상 일어나고, 창의적으로 일어나며, 주로 무의식적으로 일어난다.

문화도 기존의 방식으로부터 새로운 해결책이 나오고 구축되는 것과 같이 환경적 제약에 반응하여 변화한다는 일반적 의미에서 진화의 한 과정으로 간주되는 경우가 많다(Csanyi, 1989; Cziko, 1995; Gabora, 1996; Hofbauer & Sigmund, 1988; Lumsden & Wilson, 1981; Plotkin, 1994). 자연선택이 유기 생명체의 물리적 구조에만 국한되는 것이 아니라, 근저의 다른 요소에도 작용될 수 있다는 보편 다윈주의(Cziko, 1995, 2000; Dawkins, 1999)의 영향으로 다윈주의는 문화적 진화에 대한 수학적 모델(Cavalli-Sforza & Feldman, 1981; Schuster & Sigmund, 1983)과 계산 모델(Gabora, 1995; Spector & Luke, 1996)의 개발 등 다양한 분야에 적용되어 왔다.

Campbell(1997)은 특히 과학 행위에 대한 사회적 인식론의 함의에 많은 관심을 가지고 과학을 비롯하여 사회적 조직체가 개체와 마찬가지로 BVSR 과정을 통해 진화하고 생존하는 방식을 강조한다. 그는 언어와 표상작용을 사회성의 핵심 요소로 보고, 지식 구성에서 사회적 과정이 중요한 역할을 한다고 강조한다. Blute(2002)와 Hull(1988)은 과학에서의 문화적 진화, 특히 다양한 생태적 조건에서 과학의 진화를 체계적으로 다루었다.

2. 개별 과학자의 과학적 활동과 개인의 인지적 활동의 진화적 속성

개별 과학자가 과학적 지식을 생성하는 과정도 이제 선택 과정으로 잘 설명된다. Campbell(1960, 1974)은 과학과 기타 영역의 창의적 사고에서 맹목적 변이와 선택적 파지 이론을 제안하였고, Popper(1968)는 과학이 최적 이론의 생존에 의해 진보한다고 주장하였다. 더 최근에는 Basalla(1988)와 Vincenti(1990)가 기술적 지식도 신다윈적 과정들에 의해 진화한다고 주장하였다.

앞에서 강조한 바와 같이, Campbell(1974)은 진화를 생물학에 국한시키지 않고, 심리학 영역으로 확장시켰다. 그는 탐색되는 환경이 기억이나 지식에 대리표상(vicarious representation)된다고 주장한다. 그러므로, 인간은 지적, 창의적, 예측적 사고를 생성하고, 이것을 그 환경 요소와 비교하여 시행착오적으로 검증할 수 있다. 또는 이렇게 생성한 사고를 외부 사태를 대신하는 정신적 준거와 비교하여 검증할 수 있다. 즉, 인간은 자신의 정신 능력을 사용하여 마음속으로 아이디어를 생성하여 분석하고 검증하여 유용하거나 가치있는 것을 선택할 수 있다. 그러므로, 개인의 정신적 표상은 그 개인이 사건들을 계속 경험함에 따라 진화한다.

진화인식론적 입장에서, BVSR과 개인적 구인의 진화를 대비해볼 필요가 있다. 개인구인 심리학자는 인간이 가설을 구성한 다음 그것을 일상생활에 적용함으로써 검증한다는 입장을 취한다(Kelly, 1970). 경험한 것을 이해하는 데 이 구인이 예측력이 있거나 유용한 것으로 판명되면, 그 구인은 파지될 가능성이 높다. 그렇지 않은 경우에는 일반적으로 수정되거나 다른 구인으로 대치된다. 즉, 구인이 진화하는 과정에서 Campbell(1974)의 BVSR 과정에 따른 시행착오적 선택이 일어나므로, 행동은 일종의 실험이라고 할 수 있다.

인지 역시 다윈적 과정을 통해 일어난다는 관점에 대해, 일부 철학자들은 추측이 논박가능해야 한다는 의미, 즉 선택될 수 있어야 한다는 의미에서 지식의 성장을 다윈적이라고 보고(Popper, 1963), 어떤 철학자들은 더 나아가 과학적 활동에서 창의성이 매우 중요한 역할을 하므로 창의적 사고도 다윈적 과정을 통해서 일어난다고 주장한다(Campbell, 1960, 1965, 1987, 1990; Lorenz, 1971; Simonton, 1998, 1999a, 1999b). 인간은 변이와 선택을 통해 새로운 아이디어를 생성, 즉 현재의 사고를 다양한 방식으로 돌연변이시키고, 그러한 변이체들 중에서 가장 적합

한 것으로 보이는 것을 선택하며, 만족스런 아이디어가 나올 때까지 그것을 다시 돌연변이시키고 최상의 변이체를 선택한다는 것이 기본적인 아이디어이다. 그러므로, 사고를 일련의 작은 선택 과정으로 본다. 이러한 관점은 복사 오류와 선택의 의도성과 같은 몇 가지 측면에서 생물학적 진화와 차이가 있으나, g-t-r 휴리스틱 측면에서 본질적인 메커니즘은 같다고 볼 수 있다.

한편, Gopnik, Meltzoff(1997)는 개인 차원에서 과학자의 과학적 활동과 아이의 인지적 활동 및 그 발달을 진화적 측면에서 체계적으로 다루었다. 이들의 기본적인 주장은 아이는 세계와 다른 사람의 심리 상태에 관한 이론들을 창출, 테스트, 변화시키는 축소판 과학자라는 것이다. 아이는 대상, 행위, 다른 사람이 생각하고 느끼는 방식에 대한 이론들을 가지고 있고 그것들을 활용한다. 아이는 비록 수준은 다르지만 이와 같은 근본적 방식에서 과학자가 사용하는 것과 동일한 진화적 과정을 사용한다.

분명히, 과학적 지식은 자기 자신의 인지능력을 사용하는 개별 과학자가 없으면 성장할 수 없다. 마찬가지로, 아이가 언어와 지식을 획득하려면 개인의 인지능력들을 사용해야 한다. Gopnik, Meltzoff(1997)의 주장은 과학자가 과학적 활동을 하게 해주는 정신 능력들은 유아에게서 볼 수 있는 정신 능력들과 똑같다고 말하는 것으로 해석할 수 있다. 이러한 해석은 모든 정상인은 기본적으로 다음과 같은 사실 때문에 세계에 관해 학습할 때 사용되는 똑같은 능력을 가지고 있다는 이 저자들의 주장에 의해 지지된다. (1) 인간은 모두 똑같은 종류의 뇌를 가지고 있다. (2) 인간은 똑같은 진화적 과정에 기인하는 똑같은 인지 능력들을 가지고 있다. (3) 아이와 과학자는 같은 연속선상의 다른 극단에 위치해 있다. 이러한 일반적 주장들은 새로운 것이 아니라, 행동주의 이론과 Piaget적 이론들처럼 다루는 측면이 다를 뿐 학습 이론들의 토대이다(Erneling, 2005). 행동주의자는 조건화와 연합이 모든 인지적 성장에 수반되는 메커니즘이라고 가정한다. Piaget는 아이가 비록 성인의 관점에서 보았을 때 논리적 실수뿐만 아니라 사실적 실수를 많이 저지르지만, 모든 연령의 아이가 성인과 과학자처럼 동화와 조절을 활용하는 평형화 과정이라는 똑같은 방식으로 자기 지식을 증가시킨다고 주장한다. 그러므로, 일부 측면에서 아이와 성인의 사고가 질적으로 다르다고 하더라도, 사용되는 정신적 과정들은 본질적으로 같다. 즉, Gopnik, Meltzoff(1997)는 과학자의 과학적 활동과 아이의 인지적 활동 모두 이론 구성과 테스트를 수반한다고 주장한다.

Gopnik, Melzoff(1997)는 과학적 활동과 아이의 추론을 비교하면서, 과학에 대한 인지적 관점으로서 개별 과학자의 마음속에서 일어나는 인지적 변화들은 적어도 과학적 성장에 대한 부분적 설명이라고 하였다. 이들은 Popper(1963)가 구분한 지식의 두 가지 의미, 즉 주관적 혹은 심리적 의미로서의 사고와 이론이라고 한 마음, 의식의 상태 혹은 반응하고 행동하는 성향과, 객관적 의미로서의 지식이라고 한 이론, 문제, 논증의 명제적 내용으로 구분하지는 않았지만, 과학적 활동의 가장 중요한 측면은 이론들을 창출, 테스트, 기각하는 개별 과학자의 심리적 활동이고, 아이의 사고 과정들은 이론의 검증 · 기각 · 변화로 가장 잘 특징지워진다고 주장한다. 또한 개인의 인지발달이 과학적 활동과 유사하다고 보고 지식의 한 가지 의미로서 아이와 과학자의 인지발달 과정(주관적 의미)과 과학적 이론의 변화(객관적 의미)가 본질적으로 공통된 진화적 속성, 즉 g-t-r요소를 가지고 있다고 주장한다.

Ⅵ. 뇌기반 진화적 과학 교수학습 모형

과학 교수학습과 관련하여 볼 때, 인간의 뇌에 관한 그간의 연구는 주로 인지적 영역에 초점이 맞추어져 왔고, 좀 더 최근에는 감성의 뇌 메커니즘이 밝혀지면서 정의적 영역에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다. 개인내 차원에서 이루어지는 진화적 과정에 관한 연구도 주로 인지적 영역에 편중되어 있고, 과학자의 과학 활동을 다룰 때 일부 행동적 · 방법적 측면이 다루어졌다. Geary(2002)는 진화교육심리학(evolutionary educational psychology)을 인간에게 진화되어 선천적인 민속심리학, 민속생물학, 민속물리학 등 민속지식(folk knowledge), 추리 · 귀인 편향과 현대 사회의 학업적 학습의 관계를 연구하는 분야로 정의하고, 선천적 영역을 토대로 인류의 후천적 역사에서 발달된 학문 영역간의 격차를 좁히는 접근법을 제안한다. 그러나, 과학교육의 주요 목표 영역인 정의적, 행동적, 인지적 영역, 인간 뇌의 주요 구조 · 기능 및 뇌에서 일어나는 진화적 과정을 체계적으로 통합시킨

연구는 없는 실정이다.

과학자는 어떤 대상에 대해 알고자 하는 호기심, 의문, 지적 욕구(과학태도; 정의적 영역; 대뇌변연계)를 가지고, 그것을 직접 관찰하거나 측정하고 비교하여(과학탐구과정기능; 심체적 영역; 후두엽, 측두엽, 두정엽, 일부 전두엽), 그 대상을 이해하거나 그에 대한 개념을 구성한다(과학지식; 인지적 영역; 일부 전두엽 및 전두엽연합령). 이를 토대로 IDU (Interesting; 흥미 · 관심 갖기 → Doing; 해보기 → Understanding; 이해하기) 과정으로 이루어지는 뇌기반 과학 교수학습 모형(Model of Brain-based Science Teaching and Learning)이 제안된 바 있다(임채성, 2005). 이 모형에서 사용한 단계의 명칭들을 과학교육 주요 목표 영역의 명칭을 반영하여 ABC(Affective Component → Behavioral Component → Cognitive Component)로 변경하여 〈그림 2〉와 같이 나타낼 수 있다.

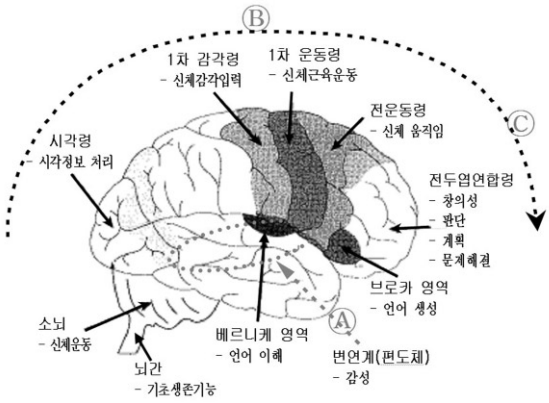

그림 2 *인간 뇌의 주요 기능 영역과 과학 교수학습 영역의 관계(임채성, 2005)*

이 그림은 인간 뇌의 주요 부위별 기능을 나타낸다. 위 바깥쪽의 점곡선은 뇌의 진화 과정과 발달 순서를 나타낸 것이고, 중앙 아래의 점타원은 뇌 내부에 위치한 대뇌변연계를 나타낸다. Ⓐ, Ⓑ, Ⓒ는 각각 정의적, 행동적(심체적), 인지적 영역과 밀접하게 관련된 뇌 부위를 나타낸다.

이 연구에서 개발하여 제안하는 모형은 지금까지 고찰한 계통발생적 측면에서의 뇌의 진화(삼위일체 뇌), 개체발생적 측면에서의 뇌 발달과 부위별 기능 분화, 그리고 실제과학(authentic science), 즉 과학자가 과학을 하는 데 수반되는 태도, 기능, 지식과 과학교육의 주요 목표 영역인 정의적, 행동적, 인지적 영역을 연계시키고, 생물학 영역에서 기원하여 견고하게 연구되고 다양한 영역에 적용되고 있는 과학적 이론으로서의 보편적 진화 이론의 핵심 요소인 변이-선택-파지(variation-selection-retention) 과정을 토대로 학생에게 과학을 과학적으로 가르치기 위한 것으로서 '뇌기반 진화적 과학 교수학습 모형(Model of Brain-based Evolutionary Scientific Teaching for the Learning)' 이라고 하였다.

이 모형을 도식화하여 나타내면 〈그림 3〉과 같고, 크게 ABC라는 세 가지 요소와 DEF (Diversifying; 다양화 → Executing, Emulating, Estimating, Evaluating; 시행 · 비교 · 추정 · 평가 · 선택 → Furthering; 적용 · 확장)라는 세 가지 단계로 이루어지는 ABC-DEF와 평가 부분으로 이루어진다. 이 모형에서 평가는 모든 요소와 단계에 걸쳐 이루어져야 하기 때문에 중앙에 위치한다.

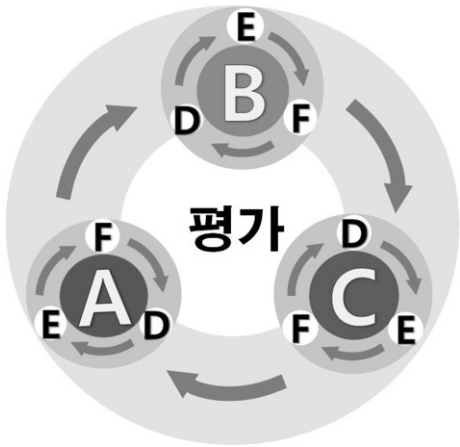

그림 3 *뇌기반 진화적 과학 교수학습 모형*

이 모형은 인간 뇌의 진화, 개체 수준에서의 뇌의 발달 및 기능 분화 패턴을 토대로 한다는 측면에서 '뇌기반' 이고, 이와 동시에 개체 사이와 개체 내에서 일어나는 생물학적 진화 과정과 뇌 내에서 일어나는 지식 획득 과정, 과학계에서 이루어지는 과학 자체의 변화 속성과 개별 과학자의 과학적 활동, 그리고 다양한 인간 활동 영역에서 나타나는 보편 선택주의적 과정을 토대로 한다는 점에서 '진화적' 이다. 이를 도식화하여 나타내면 〈그림 4〉와 같다.

우선, 뇌기반 측면에서 이 모형을 구성하는 세 가지 요소(ABC)를 고찰한다. 우리나라 과학교육과정에는 자연 현상과 사물에 대하여 흥미와 호기심을 가지고 탐구하여 과학의 기본 개념을 이해하고, 과학적 사고력과 창의적 문제 해결력을 길러 일상생활의 문제를

뇌기반(Brain-based)		
대뇌변연계	후두엽, 두정엽, 전두엽 일부	전두엽 일부, 전두엽연합령
과학태도	과학탐구기능	과학지식
정의적 요소(A)	행동적 요소(B)	인지적 요소(C)

진화적(Evolutionary)	
개체간	개체내
생물종 / 과학	면역계, 뇌 / 과학자
다양화(D) → 시행 · 비교 · 선택(E) → 확장 · 적용(F)	

그림 4 *뇌기반 진화적 접근법의 원리*

창의적이고 과학적으로 해결하는 데 필요한 과학적 소양을 기르는 데 목적이 있다고 제시되어 있으나, 구체적인 목표는 과학의 기본 개념 이해(C), 탐구 능력(B), 흥미 · 호기심(A), STS의 순서로 제시되어 있다(교육인적자원부, 2007). 정의적(A), 행동적 · 기능적(B), 인지적(C) 요소는 과학자의 과학 활동과 과학 교수학습에서 중요하지만, 이러한 방식의 목표 제시보다 뇌가 진화 · 발달하는 순서, 독립된 개인에서 외부의 정보가 뇌로 전달되어 처리되는 전반적인 방향, 과학자가 자연 사물이나 현상에 대해 흥미 · 호기심을 가지고 다양한 탐구기능을 사용하여 그 대상을 이해하는 일반적인 진행 방식 등을 고려할 때 A→B→C의 순서로 제시할 필요가 있다. 특히, 어떤 대상에 대한 정보를 받아들이고 처리할 때, 대뇌변연계와 신피질의 신경배열로 인해 감성적 측면이 인지적 측면보다 더 먼저 작용하고 더 강력한 효과를 나타내므로(임채성, 오윤화, 2004; Goleman, 1995; LeDoux, 1994), 과학 교수학습에서는 이후의 과정에 큰 영향을 미치는 첫 단계로서 긍정적 감성 상태와 흥미 · 호기심을 유발시키는 정의적 요소(A)가 매우 중요하다. 이어서 이러한 흥미와 호기심을 바탕으로 관찰, 측정, 가설설정, 데이터 분석 등 상황에 적절한 탐구기능을 선택하여 사용하는 행동적 요소(B), 그 결과와 관련된 다양한 의미를 탐색하거나 기억, 이해, 적용, 분석, 평가, 창출 등 다양한 수준의 의미를 구성(Anderson & Krathwohl, 2001)하는 활동을 통해 처음에 관심을 가졌던 대상에 대한 심층적 의미를 구성하게 하는 인지적 요소(C)가 연계되게 하는 것이 바람직하다. 이 연구에서는 전체적인 지적 기능을 최대로 활용하기 위해 이처럼 정의적 영역을 구동시키는 원리를 활용하는 것을 DARWIN (Driving Affective Realm for Whole Intellectual Network) 접근법이라고 지칭한다.

다음으로, 진화적 측면에서 이 모형의 각 요소를 구성하는 세 단계(DEF)를 고찰한다. 본 연구자는 앞에서 고찰한 다양한 연구물과 문헌의 내용을 종합하여, 다양한 영역에 적용되는 보편 다윈주의 혹은 보편 선택주의의 핵심인 변이-선택-파지 단계를 과학 교수학습 과정에 반영하는 방안으로서 흥미 · 호기심, 탐구기능, 지식의 각 영역에서 다양한 변이체를 생성하고, 이 중에서 적합한 것을 선택하여, 이후에 계속 활용하는 원리를 도출하였다. 이 원리에서 핵심 단계 중 하나인 선택의 수준과 속성을 분석적으로 고찰할 필요가 있다. 이 연구에서는 선택이 일어나는 수준에 따라 개체간-개체내 선택과 선택의 속성에 따라 비의도적-의도적 선택이라는 두 단계로 나누어 〈그림 5〉와 같이 도식화하였다. 자연 선택에서부터 흥미 · 기능 · 지식 선택에 이르기까지 다양한 영역의 선택에서 의도성의 여부나 정도의 차이가 있을 뿐 모든 영역에 걸쳐 본질적으로 g-t-r이라는 동일한 원리가 적용된다. 이 연구에서 제안하는 모형도 바로 이러한 ABC-DEF 과정을 통해 개발되었다.

이 그림에 나타낸 선택의 대상과 방식들은 대부분 앞에서 이미 고찰했으므로, 여기에서는 흥미, 기능, 지식 영역에서 이루어지는 선택에 대해 설명할 필요가 있다. 우선, 과학계에서는 자연 사물이나 현상에 대한 흥미 영역의 다양성에 의해 크게 생물학, 물리학, 화학, 지구과학 등의 학문 분야가 존재하고, 각 분야마다 고유한 연구 방법과 기능 및 개념 체계가 구축되었다. 개인 차원에서 과학자는 자신의 흥미를 토대로 생물학자, 물리학자, 화학자, 지구과학자 등으로

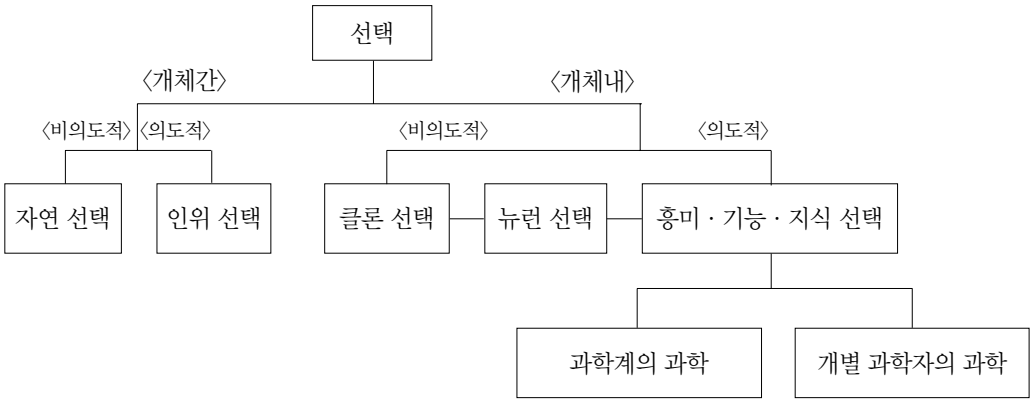

그림 5 *보편 선택주의에서 선택의 수준과 유형*

종사하며, 해당분야의 탐구 기능들 중 유용한 것을 선택하여 그 분야의 지식을 생성해내는 일을 한다. 이러한 방식은 새롭게 융합되거나 더 세분될 수 있고 수준이 다를 뿐 학생에게도 똑같이 적용될 수 있다. 즉, 학생들의 흥미, 기능, 지식 선택의 경우, 다양한 종류의 흥미 · 호기심, 알고자 하는 욕구들 중에서 자신에게 유용하거나 유익하다고 판단되는 것을 선택할 수 있고, 다양한 종류의 기능(기초탐구기능, 통합탐구기능)과 각 기능들의 수준에서 자신이 알아내고자 하는 것을 알아내는 데 적절하거나 실효성이 있을 것이라고 기대되는 것을 선택하여 사용할 수 있으며, 그 대상에 대한 직간접적 경험을 통해 구성한 다양한 의미(사실, 개념, 원리, 법칙, 이론 등)나 이들의 다양한 수준(기억, 이해, 적용, 분석, 평가, 창출 등)에서 적합한 것을 선택할 수 있다.

이제 실제 과학 교수학습 상황에서 이 모형의 각 요소와 단계별로 직접 사용할 수 있는 대표적인 활동의 예를 제시하면 〈표 1〉과 같다. 각 요소와 단계에서 학

표 1
뇌기반 진화적 과학 교수학습(ABC-DEF) 모형의 3요소와 3단계의 주요 내용

요소	단계	주요 내용
A	D	자연 사물이나 현상에 대해 자신이 흥미를 가지고 있거나 알아내고 싶은 것들을 다양한 측면에서 생각하여 모두 제시하시오. (다양화)
	E	위에서 제시한 것들을 알아냈을 경우, 각각이 자신에게 얼마나, 어떻게, 왜 유용하거나 가치 있을지 추정하여 비교하고, 가장 유용하거나 가치 있을 것이라고 기대되는 것을 선택하시오. (비교 · 선택)
	F	알아내기 위한 방법과 관련하여 앞에서 선택한 흥미 주제 내용을 구체적으로 제시하시오. (연계 · 구체화)
B	D	앞에서 선택한 흥미 주제 내용을 알아보기 위한 방법들(관찰, 측정, 분류, 실험 등)을 다양한 측면에서 생각하여 모두 제시하시오. (다양화)
	E	각각의 방법이 자신에게 얼마나, 어떻게, 왜 유용하거나 가치 있는가, 그 방법이 현실적으로 사용 가능한가, 장단점은 무엇인가 등을 고려하여 비교하고, 가장 유용하거나 가치 있는 것을 선택하시오. (비교 · 선택)
	F	예상하거나 얻고자 하는 결과와 관련하여 앞에서 선택한 방법을 구체적으로 제시하고 그 방법을 실행하여 데이터를 수집하시오. (연계 · 구체화)
C	D	직접 해보거나 경험을 통해 알아낸 것이나 간접 경험을 통해 알아낸 것들에 대한 자신의 해석이나 의미를 다양한 측면과 수준에서 생각하여 모두 제시하시오. (다양화)
	E	생각해낸 각각의 의미들이 얼마나, 어떻게, 왜 유용하거나 가치 있을지 생각하여, 가장 유용하거나 가치 있는 것들을 선택하시오. (비교 · 선택)
	F	선택한 것들을 다른 상황이나 대상에 적용 · 확장시킬 수 있는 방안을 제시하시오. (연계 · 구체화) 지금까지의 과정에서 새롭게 흥미를 갖게 된 것들도 제시하시오.(연계)

생이 제시하는 내용에 대한 적절한 피드백도 필요하다. 이 모형에서 제시하는 과정들은 실제 과학자의 과학적 활동처럼, 진행하는 중간에 필요에 따라 이전 단계로 되돌아가 새로운 항목을 추가하거나 이미 진행된 것을 수정하고 보완할 수 있다. ABC 각 요소의 D 단계에서는 가능한 한 다양한 것들을 제안하게 하거나 유발시키는 것이 중요하다. E 단계에서는 유용성, 현실성, 과학성 등에 비추어 각각의 가치를 추정하고 비교하여 가장 적절한 것을 선택하게 하되, 특히 C 요소에서는 인지적 영역 자체가 다차원, 다수준, 다측면의 속성을 가지고 있기 때문에, 어느 한 가지만 선택하기보다 유용한 것을 다수 선택하게 할 필요가 있다. F 단계에서는 해당 내용을 가능한 한 구체화하여 다음 단계로 원활하게 이어지게 한다. 물론, 이러한 과정은 개별 학생이나 집단으로 진행할 수 있다. 모둠으로 진행할 경우에는, 모둠을 구성하는 각 개인의 뇌가 가지고 있는 흥미, 기능, 정보의 고유성을 활용하여 창발성(emergent property)이 발휘되게 할 필요가 있다(임채성, 1997).

또한, ABC 각 요소와 DEF 각 단계에서는 교사, 학생 자신, 혹은 동료 학생이 관찰, 면담, 포트폴리오, 수행, 지필 등 다양한 평가 방법 중에서 유용하거나 적절한 것을 선택하여 평가를 실시해야 한다.

이러한 과정들은 Campbell(1974)이 진화인식론에서 주장한 대리 맹목 변이(vicarious blind variation) 및 선택적 파지와 본질적인 측면에서 일치한다. 즉, 다양한 외현적 행동을 직접 시도해보고 적절한 것을 선택하는 것과 같이 비용이 많이 소요되거나 위험성이 높은 접근법보다는 머리 속에서 다양한 아이디어를 생성하고 각각의 가치를 추정하거나 비교하여 가장 적절한 것을 선택하는 일종의 정신 다윈주의적 과정이다(Langs, 1996b). Campbell은 창의적 사고, 문제해결, 기술적 진보, 과학적 진보를 사고 시도(thought trial)의 누적적 맹목 변이 · 선택을 수반하는 과정으로 보고 지식의 출현과 발달을 보편 다윈주의로 설명한다. 이 연구에서 제안하는 뇌기반 진화적 과학 교수학습 모형은 이러한 과정을 과학 교수학습의 정의적, 행동적, 인지적 영역 각각에서 다양화 → 비교 · 추정 → 확장 · 적용하는 과정으로 구체화한 것이다. Campbell의 관점과 이 모형의 한 가지 중요한 차이는 과학 교수학습에서 흥미, 방법, 지식 등을 다양화하는 과정이 맹목적이 아니라 의도적이라는 점이다. 관심을 갖는 영역에 대한 배경 정보나 기능이 부족할 때에는, 맹목성이 증가하여 Sweller(2003, 2004)가 주장하는 조합 폭증 현상이 일어날 수 있으므로, 대부분의 학교 상황에서는 학생들의 배경 정보나 기능 수준을 고려하여 이 모형을 실시해야 더 효과적일 수 있다. 물론, 조합 폭증 현상에도 불구하고, 학습자에게 생소한 분야를 탐구하게 할 경우에도 이 모형을 적용할 수 있다.

이 모형을 현재의 우리나라 학교 시스템의 정규 수업에 적용할 때, 한 차시에 전체 요소와 단계들을 모두 실행하기에는 시간의 부족이나 활동 관리 측면 등 어려움이 많이 있을 수 있으므로 차시를 나누어 실시한 후 연계시키거나, 연차시로 실시하는 것이 바람직할 것이다.

한편, 2007년 개정 과학교육과정에서 새로 도입된 '자유탐구'의 지도에도 적용하면 효과적일 것이다. 자유탐구가 도입된 것은 바람직하나, 현재처럼 한 학년에서 6차시의 1회성으로 실시하는 것보다, 학생 개인이 모든 학교급과 학년에 걸쳐 이 모형에 내재된 실제과학의 속성을 충분히 반영하여 수행한 것을 누적해 나아가게 한다면, 학생 자신에게 과학에 대한 성취감을 제공할 뿐만 아니라, 그것을 토대로 교사의 심층적 지도도 가능할 것이다. 이렇게 볼 때, 한 학년의 6차시 분량은 현실적으로 많이 부족하므로, 자유탐구에 더 많은 시수를 배정하거나 정규 과학 교육과정의 시수를 증가시키고 그 중 일정 분량, 예를 들면 4/5 정도를 모든 학생이 공통적으로 학습하는 내용으로 구성하고, 일정 분량(1/5 정도)을 자유탐구 방식으로 구성하여 진행하는 방안을 모색할 필요가 있다. 즉, 원래 '달리는 길'이라는 의미의 어원을 둔 curriculum [curre(달리다) + culum(과정)]에서, 정규 과학 교육과정을 모든 학생이 공통적으로 이수하는 'Science Curriculum'과 학생 개인별로 고유한 실제 과학 경험이나 경력을 누적해 나아가게 하는 'My Science Careerculum' 혹은 '나의 과학 활동'으로 나누어 병행하는 방안을 시도할 필요가 있다. 이러한 방식은 소수의 학생을 실제과학적 측면에서 집중적으로 지도하는 영재교육에서도 활용 가치가 높다고 할 수 있다.

Ⅶ. 결론 및 제언

1. 결론

본 연구에서는 계통발생적 측면에서의 인간 뇌의 진화, 개체발생적 측면에서의 뇌 발달과 부위별 기능 분화, 그리고 과학자가 과학을 하는 데 수반되는 요소와 과학교육의 주요 목표 영역을 연계시키고, 생물학 영역을 초월하여 다양한 영역에 적용되고 있는 보편 선택주의에 의한 진화 이론의 핵심 요소인 변이-선택-파지 과정을 토대로 학생에게 과학을 실제과학적이고 효과적으로 가르치기 위한 뇌기반 진화적 과학 교수학습 모형(ABC-DEF)을 개발하였다.

이 모형의 주요 특징과 활용 방법은 다음과 같다. 첫째, 이 모형은 과학태도(정의적 영역; A), 과학탐구 기능(행동적 영역; B), 과학지식(인지적 영역; C)이라는 세 가지 요소로 구성된다. 둘째, 흥미, 기능, 지식의 각 요소는 변이-선택-파지에 상응하는 다양화(D), 비교 · 선택(E), 확장 · 적용(F)이라는 세 단계로 구성된다. 셋째, 과학 교수학습 과정에서 각 요소와 단계마다 적절한 평가가 이루어지게 하였다.

2. 제언

이 모형에 대한 연구 및 활용과 관련하여 다음과 같은 제언을 할 수 있다. 첫째, 보편 선택주의에서는 적용되는 분야마다 선택의 본질과 단위가 고유하게 정의되고 가끔 논란이 되므로, 과학 교수학습 상황에서 이를 명료화하는 연구가 필요하다. 둘째, 학교 현장의 실제 과학 교수학습 상황에 적용하여 각 요소와 단계가 작용하는 구체적인 메커니즘을 규명하는 연구가 필요하다.

국문 요약

이 연구에서는 뇌기반 진화적 교육 원리를 도출하기 위하여, 인간 뇌의 구조적 · 기능적 특징, 개체간과 개체내에서 일어나는 생물학적 진화, 뇌내에서 일어나는 진화적 과정, 과학 자체와 개별 과학자의 과학적 활동에 내재된 진화적 속성에 관한 연구물을 리뷰하였다. 이렇게 하여 도출된 인간 뇌의 주요 특징과 생성-선택-파지를 핵심 요소로 하는 보편 다윈주의 혹은 보편 선택주의를 토대로, 뇌기반 진화적 과학 교수학습 모형을 개발하였다. 이 모형은 세 가지 요소와 세 가지 단계 및 평가로 이루어진다. 세 가지 요소는 정의적, 행동적, 인지적 요소이고, 각 요소를 구성하는 세 단계는 다양화 → 비교 · 선택 → 확장 · 적용(ABC-DEF; Affective, Behavioral, Cognitive components - Diversifying → Emulating, Estimating, Evaluating → Furthering steps)이다. 이 모형에서 정의적 요소(A)는 인간 뇌에서 감성을 관장하는 대뇌변연계에 토대를 두고 자연 사물과 현상에 대한 학습자의 흥미 · 호기심과 관련된다. 행동적 요소(B)는 시각 정보를 처리하는 후두엽, 언어 정보의 이해 · 생성과 관련된 측두엽, 감각운동 정보를 처리하는 감각운동령을 수반하고 과학적 활동의 직접 해보기와 관련된다. 인지적 요소(C)는 사고, 계획, 판단, 문제해결과 관련된 전두엽합령에 토대를 둔다. 이 모형은 이러한 측면에서 '뇌기반(brain-based)' 이다. 이 모형의 세 가지 각 요소를 구성하는 세 단계에서, 다양화 단계(D)는 각 요소에서 다양한 변이체를 생성하는 과정이고, 가치나 유용성에 비추어 비교 · 선택하는 단계(E)는 변이체들 중 유용하거나 가치 있는 것을 검증하여 선택하는 과정이며, 확장 · 적용 단계(F)는 선택된 것을 유사한 상황으로 확장하거나 적용하는 단계이다. 이 모형은 이러한 측면에서 '진화적(evolutionary)' 이다. ABC 세 요소에 대해, 과학적 활동에서 감성적 요인이 출발점으로 갖는 중요성과 뇌에서 사고 기능과 관련되는 신피질에 비해 감성을 관장하는 대뇌변연계의 우세한 역할을 반영하여 DARWIN (Driving Affective Realm for Whole Intellectual Network) 접근법을 강조한다. 이 모형은 학교 현장에서 다루는 과학 주제와 학생의 특징에 따라 다양한 형태와 수준으로 융통성 있게 실행될 수 있다.

※ 이 연구에서 제시하는 모형의 그림을 완성하는 데 많은 도움을 주신 정다운 선생님께 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

강호감 (1991). 두뇌의 기능분화에 따른 교수전략이 창의력 및 자연과 학업성취도에 미치는 영향. 서울대학교 박사학위논문.

교육인적자원부 (2007). 과학과 교육과정. 대한교과서주식회사.

권용주 (1998). 청소년들에게서 전두연합령은 어떻게 과학적 추론 및 과학개념 변화의 수행을 매개하는가? 한국과학교육학회지, 18(3), 427-442.

김용진 (2000). 학습 활동의 뇌파 분석에 기초한 두뇌 순환 학습 모형의 개발과 과학 학습에의 적용. 서울대학교 대학원 박사학위 논문.

김재영 (2000). 뇌기능 발달에 기초한 초등과학 교육과정 개발에 관한 연구. 서울대학교 대학원 박사학위 논문.

배진호 (1999). 과학교육에서 두뇌학습 원리에 기초한 창발수업모형의 개발. 서울대학교 대학원 박사학위 논문.

신동훈 (2006). 생물학 가설 생성에서 나타나는 과학적 감성의 생성 과정 설명을 위한 신경 인지적 모형 개발. 한국생물교육학회지, 34(2), 232-245.

임채성 (1992). 일중 시간에 따른 인지기능의 변화에 의거한 고등학교 학생의 과학학습 증진을 위한 교수 전략. 서울대학교 박사학위 논문.

임채성 (1997). 협동학습의 대뇌생물학적 기초: 아이디어-공유-창출 모델. 한국생물교육학회지, 25(2), 143-155.

임채성 (2005). 뇌 기능에 기초한 과학 교수학습: 뇌 기능과 학교 과학의 정의적 · 심체적 · 인지적 영역의 연계적 통합 모형. 초등과학교육, 24(1), 86-101.

임채성, 오윤화 (2004). 초등학교 학생이 지각한 감성 상태와 과학 학습 경험에 대한 기억의 관계. 한국생물교육학회지, 32(2), 173-180.

최선영 (1999). 전뇌학습 프로그램이 초등학생의 창의력, 자연과 학업성취도, 과학적 태도 및 학습양식에 미치는 효과. 서울대학교 대학원 박사학위 논문.

Adams, P. (1998). Hebb and Darwin. Journal of Theoretical Biology, 195, 419-438.

Anderson, L. W., & Krathwohl, D. R. (2001, Eds.). A taxonomy for learning and assessing : A revision of Bloom's taxonomy of educational objectives. Allyn & Bacon.

Armony, J. L., & LeDoux, J. E. (2000). How danger is encoded: Toward a systems, cellular, and computational understanding of cognitive-emotional interactions in fear. In M. S. Gazzaniga (2nd ed.). The new cognitive neuroscience. A Bradford Book. Cambridge, The MIT Press. pp. 1067-1079.

Basalla, G. (1988). The evolution of technology. Cambridge: Cambridge University Press.

Beer, R. D. (2000). Dynamical approaches to cognitive science. Trends in Cognitive Sciences, 4(3), 91-99.

Blute, M. (2002). The evolutionary ecology of science. Journal of Memetics, 7(1), 21pp. http://jom-emit.cfpm.org/2003/vol7/blute_m.html.

Bowler, P. J. (1996). Life's splendid drama: Evolutionary biology and the reconstruction of life's ancestry. Chicago, The University of Chicago Press. pp. 1860-1940.

Burnet, F. M. (1957). A modification of Jernes theory of antibody production using the concept of clonal selection. Australian Journal of Science, 20, 67-69.

Buss, D. (2007, 3rd Ed.). Evolutionary psychology: The new science of the mind. Allyn & Bacon. [김교헌, 권선종, 이홍표 옮김 (2005, 2판). 마음의 기원: 진화심리학. 나노미디어.]

Caine, R. N., & Caine, G. (1994). Making connections: Teaching and the human brain. Addison-Wesley.

Calvin, W. H. (1987). The brain as a Darwin machine. Nature, 330, 33-43.

Campbell, D. T. (1960). Blind variation and selective retention in creative thought as in other knowledge processes. Psychological Review, 67, 380-400.

Campbell, D. T. (1965). Variation and selective retention in socio-cultural evolution. in H. R. Barringer, G. I. Blanksten and R. W. Mack(Ed.). Social change in developing areas: A reinterpretation of evolutionary theory. Cambridge, MA, Schenkman.

Campbell, D. T. (1974). Evolutionary epistemology. In P. A. Schilpp (Ed.) The

philosophy of Karl Popper. (413-463). LaSalle, IL: Open Court.

Campbell, D. T. (1987). Evolutionary epistemology. in G. Radnitzky and W. W. Bartley III (Ed.). Evolutionary epistomology: rationality and the sociology of knowledge. LaSalle, IL, Open Court.

Campbell, D. T. (1990). Epistemological roles for selection theory. In N. Rescher (Ed.) Evolution, cognition, and realism. Lanham, MD: University Press, pp. 1-19.

Campbell, D. T. (1997). From evolutionary epistemology via selection theory to a sociology of scientific validitiy. Evolution and Cognition, 3, 5-38.

Cavalli-Sforza, L. L., & Feldman, M. W. (1981). Cultural transmission and evolution: A quantitative approach. Princeton, Princeton University Press.

Csanyi, V. (1989). Evolutionary systems and society: A general theory of life, mind and culture. Durham, NC, Duke University Press.

Cziko, G. (1995) Without miracles: Universal selection theory and the second Darwinian revolution. Cambridge, Massachusetts and London, England: A Bradford Book, The MIT Press.

Cziko, G. (2000). The things we do: Using the lessons of Bernard and Darwin to understand the what, how, and why of our behavior. MIT Press. London. pp. 177-198.

Damasio, A. (1994). Descartes' error: Emotion, reason, and the human brain. New York: A Grosset/putnam Book.

Darwin, C. (1859). The origin of species by means of natural selection, or the preservation of favored races in the struggle for life. Champaign: Project Gutenberg.

Dawkins, R. (1976) The Selfish Gene. Oxford University Press

Dawkins, R. (1999). The extended phenotype. Oxford, Oxford University Press. [홍영남 옮김, (2004). 확장된 표현형. 을유문화사.]

Dehaene, S., Changeux, J. P., & Nadal J. P. (1987). Neural networks that learn temporal sequences by selection. Proceedings of National Academy of Sciences USA, 84, 2727-2731.

Dobzhansky, T. (1951). Genetics and the origin of species. Columbia University Press.

Edelman, G. M. (1981). Group selection as the basis for higher brain function. In F. O. Schmitt, F. G. Worden, G. Adelman, and S. G. Dennis (Ed.), The organization of the cerebral cortex. Cambridge, Mass., USA: MIT Press, 1981.pp. 535-563.

Edelman, G. M. (1987). Neural Darwinism: The theory of neural group selection. Basic Books, NY.

Edelman, G. M. (1992). Brilliant air, brilliant fire: On the matter of the mind. London: Penguin.

Edelman, G. M. (1993) Neural Darwinism: selection and reentrant signaling in higher brain function. Neuron, 10, 115-125.

Erneling, C. E. (2005). Is cognitive development equivalent to scientific development? In C. E., Erneling, and D. M., Johnson, The mind as a scientific object: Between brain and culture. Oxford University Press.

Gabora, L. (1995). Meme and variations: A computer model of cultural evolution. in L. Nadel and D. Stein (Ed.). Lectures in complex systems. Boston, MA, Addison-Wesley. pp. 471-486.

Gabora, L. (1996). A day in the life of a meme. Philosophica, 57, 901 -938.

Gardner, H. (1983). Frames of minds: The theory of multiple intelligences. New York: Basic Books. [이경희 역 (1993). 마음의 틀. 문음사.]

Gardner, H. (1999). Intelligence reframed : Multiple intelligence for the 21st century. Basic

Books. [문용린 옮김 (2001). 다중지능: 인간 지능의 새로운 이해. 김영사.]

Gazzaniga, M. S. (1985), The social brain: Discovering the networks of the mind. Gazzaniga Basic Books, New York.

Gazzaniga, M. S. (1992) Nature's mind: The biological roots of thinking, emotions, sexuality, language and intelligence. London: Penguin Books.

Gazzaniga, M. S. (1992) Nature's mind: The biological roots of thinking, emotions, sexuality, language and intelligence. London: Penguin Books.

Gazzaniga, M. S., Ivry, R. B., & Mangun, G. R. (1998). Cognitive neuroscience: The biology of the mind. New York: W. W. Horton & Co.

Geary, D. C. (2002). Principles of evolutionary educational psychology. Learning and Individual Differences, 12, 317-345.

Geary, D. C. (2007). Educating the evolved mind: Conceptual foundations for an evolutionary educational psychology, In J. S. Carlson and J. R. Levin (Eds.), Educating the evolved mind: Conceptual foundations for an evolutionary educational psychology. Information Age Publishing. pp. 1-99.

Goleman, D. (1995). Emotional intelligence. New York: Bantam Books. [황태호 옮김 (1997). 감성지능(상, 하). 비전코리아.]

Gopnik, A., & Meltzoff, A. N. (1997). Words, thoughts, and theories. Cambridge, MA: MIT Press.

Gould, S. J. (1977). Ontogeny and phylogeny. Cambridge, The Belknap Press of Harvard University Press.

Gould, S. J. (1983). The hardening of the modern synthesis. In M. Grene (Ed.), Dimensions of Darwinism - Themes and counterthemes in twentieth-century evolutionary theory. USA: Cambridge University Press. pp. 71-93.

Grobstein, P. (2005). Revisiting science in culture: Science as story telling an story revising. Journal of Research Practice 1(1), Article M1. Retrieved 1 November 2007 from http://jrp.icaap.org/index.php/jrp/article/view/9/18.

Hall, B. K. (1992). Evolutionary developmental biology. London, Chapman & Hall.

Harvey, I., Di Paolo, E., Wood R., Quinn, M., & Tuci E. (2005). Evolutionary robotics: A new scientific tool for studying cognition. Artificial Life, 11(1), 79-98.

Harvey, I., Husbands, P., Cliff D., Thompson, A., Jakobi, N. (1997). Evolutionary robotics: The Sussex approach. Robotics and Autonomous Systems, 20, 205-224.

Hebb, D. (1949). The organization of behavior. New York: Wiley.

Hofbauer, J., & Sigmund, K. (1988). The theory of evolution and dynamical systems. Cambridge, Cambridge University Press.

Hull, D. L. (1988). Science as a process: An evolutionary account of the social and conceptual development of science. The University of Chicago Press, Chicago. [한상기 옮김 (2008). 과정으로서의 과학 1, 2.: 과학 발전에 대한 진화론적 설명. 한길사.]

Hutterlocher, P. R. (1990). Morphometric study of human cerebral cortex development. Neuropsychologia, 28, 517-527.

Jensen, E. (2nd ed. 2000). Brain-based learning. Turning Point Publishing.

Jerne, N. K. (1955). The natural-selection theory of antibody formation. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 41, 849-857.

Kauffman, S. (1995). At home in the universe. New York: Oxford University Press.

Kelly, G. A. (1977). The psychology of the unknown. In D. Bannister (Ed.), New perspectives in personal construct theory. London: Academic Press. pp. 1-19.

Langs, R. (1996a). The evolution of the emotion-processing mind: With an introduction to mental Darwinism. International University Press.

Langs, R. (1996b). Mental Darwinism and the evolution of the emotion-processing mind. American Journal of Psychotheraphy, 50(1), 103-123.

LeDoux, J. E. (1994). Emotion, memory, and brain. Scientific American, 270(6), 50-57.

LeDoux, J. E. (1996). The emotional brain: The mysterious underpinnings of emotional life. New York: Simon & Schuster.

LeDoux, J. E. (2000). Emotion circuits in the brain. Annual Review of Neuroscience, 23, 155-184.

Lefton, L. A., & Brannon, L. (2006, 9th Ed.). Psychology. Allyn & Bacon.

Lewontin, R. C. (1970). The units of selection. Annual Review of Ecology and Systematics, 1, 1-18.

Lorenz, K. (1971) Studies in animal and human behavior. Cambridge, MA, Harvard University Press.

Lumsden, C., & Wilson, E. (1981). Genes, mind, and culture: The coevolutionary process. Cambridge, MA, Harvard University Press.

MacLean, P. D. (1978). A mind of three minds: Educating the triune brain. In J. Chall & A. Mirsky (Eds.) Education and the brain. Chicago: University of Chicago Press.

MacLean, P. D. (1990). The triune brain in evolution. New York: Plenum Press.

Mayr, E. (1982). The growth of biological thought: Diversity, evolution and inheritance. Harvard University Press, Cambridge

Nolfi, S., & Floreano, D. (2000). Evolutionary robotics: The biology, intelligence, and technology of self-organizing machines. Cambridge, MA: MIT Press/Bradford Books.

Panksepp, J. (1998). Affective neuroscience: The foundations of human and animal emotions. New York, Oxford: Oxford University Press.

Pauling, L. (1940). A theory of the structure and process of formation of antibodies. Journal of the American Chemical Society, 62, 2643-2657.

Petrinovich, L. (1997). Human evolution, reproduction, and morality. Springer.

Pfeifer, R., & Scheier, C. (1999). Understanding intelligence. Cambridge, MA: MIT Press.

Plotkin, H. (1994). Darwin machines and the nature of knowledge. Harvard University Press. Cambridge.

Popper, K. R. (1963). Conjectures and refutations: The growth of scientific knowledge. London: Routledge and Kegan Paul. [이한구 옮김. (2001). 추측과 논박 1, 2. 민음사.]

Popper, K. R. (1968). The logic of scientific discovery. New York: Harper and Row.

Quartz, S. R., & Sejnowski, T. J. (1997). The neural basis of cognitive development: A constructivist manifesto. Behavioral and Brain Sciences, 20, 537-596.

Schaverien, L., & Cosgrove, M. (1999). A biological basis for generative learning in technology-and-science Part I: A theory of learning. International Journal of Science Education, 21(12), 1223-1235.

Schaverien, L., & Cosgrove, M. (2000). A biological basis for generative learning in technology-and-science Part II: Implications for technology-and-science education. International Journal of Science Education, 22(1), 13-35.

Schuster, P., & Sigmund, K. (1983). Replicator dynamics. Journal of Theoretical Biology, 100, 533-538.

Simonton, D. K. (1998). Donald Campbell's model of the creative process: Creativity as

blind variation and selective retention. Journal of Creative Behavior, 32, 153-158.

Simonton, D. K. (1999a). Creativity as blind variation and selective retention: Is the creative process Darwinian?, Psychological Inquiry, 10, 309-328.

Simonton, D. K. (1999b). Origins of genius: Darwinian perspectives on creativity. New York, NY, Oxford University Press.

Sousa, D A. (2001, 2nd ed.). How the brain learns. Thousand Oaks, CA: Corwin Press. pp. 245-274.

Spector, L., & Luke, S. (1996). Culture enhances the evolvability of cognition. in G. Cottrell (Ed.). Proceedings of the Eighteenth Annual Conference of the Cognitive Science Society. Mahwah, NJ, Lawrence Erlbaum Associates. pp. 672-677.

Striedter, G. F. (2005). Principles of brain evolution. Sinauer Associates.

Sweller, J. (2003). Evolution of human cognitive architecture. In B. Ross (Ed.), The psychology of learning and motivation, Vol. 43. San Diego, CA: Academic Press. pp. 215-266.

Sweller, J. (2004). Instructional design consequences of an analogy between evolution by natural selection and human cognitive architecture. Instructional Science, 32, 9-31.

Sweller, J. (2006). Natural information processing systems. Evolutionary Psychology, 4, 434-458.

Sylwester, R. (1995). A celebration of neurons: An educator's guide to the human brain. Alexandria, VA: Association for Supervision and Curriculum Development.

Sylwester, R. (2000). A biological brain in a cultural classroom: Applying biological research to classroom management. Thousand Oaks, CA: Corwin Press.

Talmage, D. W. (1959). David W. Talmage, Immunological specificity: Unique combinations of selected natural globulins provide an alternative to the classical concept. Science, 129, 1643-1648.

Tonegawa, S., Steinberg, C., Dube, S., & Bernardini, A. (1974). Evidence for somatic generation of antibody diversity. Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS), 71, 4027-4031.

Vincenti, W. G. (1990) What engineers know and how they know it: Analytical studies from aeronautical history. Baltimore: Johns Hopkins University Press.

Waddington, C. H. (1977). (published posthumously). Tools for thought. London: Jonathan Cape Ltd

Wilson, D. S. (2007). Evolution for everyone: How Darwin's theory can change the way we think about our lives. Delta.