

뇌기반 학습과학: 뇌과학이 교육에 대해 말해 주는 것은 무엇인가?*

Brain-based Learning Science: What can the Brain Science Tell us about Education?

김 성 일**
(Sung-il Kim)

요약 인간은 보고, 듣고, 따라하고, 행하고, 느끼면서 배운다. 이 모든 과정에 뇌가 관여한다. 최근 뇌과학 연구의 비약적 발전과 뇌과학 연구와 인지과학 연구의 활발한 협력은 '뇌기반 학습과학(Brain-Based Learning Science)', '교육신경과학(Educational Neuroscience)', 혹은 신경교육학(Neuro-Education)이라 불리우는 새로운 연구 분야를 탄생시켰다. 뇌기반 학습과학은 기존의 '학습과학'을 넘어서 실제 학습과 교육환경에 적지 않은 변화를 줄 것으로 기대되는 만큼 그 가능성에 대해 회의적인 입장도 공존하고 있다. 이 논문에서는 뇌기반 학습과학의 정의와 기본가정을 살펴보고, 인지신경과학의 최신 연구가 어떻게 이루어지고 있는지를 소개하고 이러한 연구결과에서 교육적 함의를 도출해 보고자 하였다. 또한 신경계에 대한 신화적 사고와 그 문제점을 열거하고, 뇌과학과 학습-교육 현장의 연계 가능성 및 향후 뇌기반 학습과학의 전망과 한계에 대해 논의하였다.

주제어 뇌기반 학습과학, 교육신경과학, 신경교육학, 뇌과학, 교육학, 뇌발달, 학습, 학습장애, 학습환경 설계

Abstract Humans learn by observing, hearing, imitating, doing, and feeling. The brain(cortex) is the central core of this process. The recent rapid progress of brain science and the active interdisciplinary collaboration between brain science and cognitive science opens a new possibility. That is a new research field called 'Brain-Based Learning Science', 'Educational Neuroscience', or 'NeuroEducation'. This study reviews the nature and basic assumptions of brain-based learning science, current directions in educational neuroscience research, the neuro-myths, educational implications of neuroscience, and a possibility of making a meaningful connection between brain science and education. Also the future prospects and limitations of the brain-based learning science are discussed.

Keywords brain-based learning science, educational neuroscience, neuroeducation, brain science, education, brain development, learning, learning disabilities, design of learning environment

* 이 연구는 2004년 고려대학교 특별연구비 지원으로 수행되었음(과제번호 K0400961). 줄고를 꼼꼼하게 읽고 귀중한 조언을 해 주신 익명의 심사위원들께 감사드린다.

** 고려대학교 교육학과, 서울시 성북구 안암동 5가 1번지, E-mail: sungkim@korea.ac.kr

머리말

자신이 속한 사회의 교육제도와 교육환경 개선에 대한 열망과 의지가 갈수록 높아지는 현상은 세계적으로 공통된 현상이다. 이러한 현상이 발생하는 이유는 현재의 교육정책으로는 교육수요자의 불만을 해소하고 비효율적인 교육방식을 개선하여 국가적 경쟁력을 확보할 수 없다고 판단하기 때문일 것이다. 학교에서 학습한 내용이 새로운 분야에 전이되지 못하거나 창의적인 문제 해결에 제대로 적용하지 못할 뿐만 아니라 학습자가 지니는 적성을 제대로 계발하지 못하여 학습에 대한 흥미와 동기는 현저히 떨어지고, 사회 구성원으로서 갖추어야 할 기본적인 도덕성과 삶에 대한 진지한 성찰적 태도는 상실한 채 기능만을 기계적으로 익히는 현재의 교육제도에는 근본적이고 혁신적인 변화가 요구된다.

그러나 이러한 교육의 제반 문제를 해결할 만한 효율적인 교육정책이 제안되지 못하고 이를 뒷받침할 만한 합리적인 근거를 찾아 내지 못하고 있는 이유는 무엇일까? 그 주된 이유는 교육의 중심에 학습하는 인간이 있어야 함에도 불구하고 인간에 대한 근원적인 이해를 바탕으로 하지 않은 제도와 미봉책들이 난립해 왔기 때문이다. 기존의 교육정책과 교육계의 실체는 비과학적이고 낙후된 교육관과 상식 혹은 이데올로기에 기초한 주장으로 점철되어 왔다. 풍부하고 객관적인 자료의 수집과 분석을 통한 합리적인 추론 및 예측에 근거하지 않은 비과학적 교육 패러다임의 비효율성은 이미 널리 알려져 있다(Slavin, 2002). 이러한 교육환경에서는 학습자의 잠재력을 개발하고 자존감을 높여 학습자가 건전한 사회인으로 발달하는데 도움을 주는 것은 물론

미래를 위한 전문인력을 양성하는 것 또한 어렵다.

이처럼 과거 20여 년간 전 세계를 지배한 교육패러다임은 교육제도의 거시적 효과에 중점을 두는 교육정책 중심이었다. 그러나 최근 들어서는 학습자 개인의 학습효과와 같은 미시적 효과에 초점을 맞추고 있으며, 공동체 학습이나 서비스 기반 학습 등의 접근을 통해 개인의 학습과정이 사회적 네트워크와 연계성을 맺게 됨으로써 학습과 교육의 인지생태적 가치를 높이려는 방향으로 변화되고 있다. 이러한 변화 추세와 함께 최근에 등장한 인지신경학적 연구는 주로 미시적 수준에서 이루어지고 있지만, 학습자의 변화와 적응에 초점을 맞추어 이미 학습자의 발달 및 학습과정에 대한 중요한 함의점을 제공해 주고 있으며, 교육과정의 설계는 물론 학습재료의 구성 및 교수법, 학습에서의 개인차와 평가방식의 개발 등을 포함하는 학습환경의 설계에 적지 않은 변화를 예고하고 있다.

과거에는 '뇌'나 '인지'에 대한 연구가 '교육'과는 독립적으로 이루어지면서 교육학 분야에서 필요한 연구결과들을 발췌해 적용해나가는 방식으로 이루어져 왔다. 또한 각 학문간의 절대적 경계가 불분명해지면서 발생하기 시작한 학제적 연구 경향은 인지과학과 교육학 간의 새로운 학제적 협력을 유발시키고 있지만, 동시 협력을 통한 시너지 효과를 일으키지 못하고 있는 실정이다. 하지만 최근 뇌과학 연구의 비약적 발전과 뇌과학 연구와 인지과학 연구의 활발한 협력은 기존의 '학습과학'에 대한 새로운 가능성을 열어주고 있다. 그 가능성이 바로 '뇌기반 학습과학(Brain-Based Learning Science)', '교육신경과학(Educational Neuroscience)' 혹은 '신경교육학(Neuro-Education)'이라 일컬어

지는 연구분야이다. 뇌기반 학습과학에서는 학습자 중심의 과학적 접근을 통해 실제 학습자의 뇌에서 발생하는 변화에 초점을 맞추어 각종 교수/학습 방법을 포함한 다양한 학습환경을 최적화하는 것을 목적으로 한다. 이 논문에서는 학습과 관련된 대표적인 인지신경과학적 연구의 예를 소개하고 이를 교육장면에 적용할 수 있는 가능성을 탐색해 보고, 신경계에 대한 신화적 사고와 그 문제점을 열거하고, 미래의 뇌기반 학습과학의 전망에 대해 논의하고자 한다.

뇌기반 학습과학 연구의 최근 동향

미국에서는 지난 90년대의 10년을 뇌의 십년이라 명할 만큼 최근 뇌에 대한 연구가 엄청난 속도로 이루어지고 있다. 최근 개발되고 있는 뇌영상 기법의 발달은 학습과 교수에 관한 학제간의 접근을 가능하게 만들었으며, 인지신경과학과 인지과학 분야의 연구 결과를 토대로 학습과 교육장면에서의 적용 가능성을 탐색하고 있는 추세이다. 일례로 뇌기반 학습(brain-based learning)이나 뇌기반 교수(brain-based teaching) 및 뇌맞춤 교과과정(brain-compatible curriculum) 개발 등의 뇌와 학습을 연결하는 새로운 접근이 시도되고 있다(예, Caine & Caine, 1997; Jensen, 2000).

물론 현재 수준의 뇌 인지/사고 기능에 대한 인지신경과학적 연구결과로는 실제 교육장면에 직접적으로 적용할 수 있는 구체적인 학습환경 디자인 원리를 도출해 내기는 어렵다. 그러나 뇌의 발달과 기능에 대한 연구결과가 누적된다면, 교과과정의 구성, 학습자료 및 교육방법의 개발, 그리고 학습과 관련된 진단과

평가 도구의 개발 등의 영역에서 변화가 예상된다.

외국에서는 오래전부터 기존의 각종 교육을 추상적 교육철학개념이나 직관적 교사의 인문적 기술 중심이라는 비과학적 체제에서 벗어나서 '과학기반 교육(SBE: Science-Based-Education)'으로 변화되고 있고 있다. 지난 몇 년 사이에 해외에서는 각종 학교와 산업체 등에서의 각종 학습 과정을 효율화시키는 방법을 연구하고 응용하는 '학습과학(Learning Science)'이 인지과학을 주요분야로 자리잡아 가고 있다. 이러한 변화와 함께 인지과학의 전통적 연구주체가 뇌과학적 접근과 접목되면서, 학습과학의 연구주체와 응용개발 역시 뇌기반 학습을 중심으로 매우 빠른 속도로 연계되어 가고 있다.¹⁾

뇌기반 학습과학은 인간의 사고 및 학습과정에 대한 과학적이고 체계적인 접근방법으로 뇌의 인지기능 및 구조에 대한 과학적 이해를 바탕으로 학습자의 뇌를 효율적으로 활용할 수 있는 적절한 교수/학습환경을 디자인하고자 하는 실용적 목표를 둔 새로운 접근이다. 뇌기반 학습과학의 필요성은 이미 뇌과학에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있는 미국과 일본, 영국, 그리고 이들이 주축이 된 경제협력개발기구의 교육연구혁신센터(Organization for Economic Co-operation and Development, Centre for Educational Research and Innovation: OECD-CERI)에서 1999년부터 2002년까지 진행한 '학습과학과 뇌연구(Learning Science and the Brain

1) 기존의 학습과학은 주로 컴퓨터를 이용한 학습에 대한 과학적 접근을 일컫는 반면, 뇌기반 학습과학은 학습은 뇌에서 발생한다는 전제하에 신경과학적 연구를 비롯한 행동관찰 연구를 모두 포함하는 보다 포괄적인 패러다임이라 할 수 있다.

Research)' 프로젝트를 진행하여 2000년 6월에는 뉴욕에서 '뇌 기제와 초기학습'이라는 주제로, 2001년 2월에는 스페인 그라나다에서 '뇌 기제와 유년기 학습'이라는 주제로 2001년 4월에는 도쿄에서 '성인들의 뇌 기제와 학습'이라는 주제로 모두 세 번의 포럼을 개최했고 2002년에는 '뇌의 이해: 신 학습과학을 향해'라는 주제의 보고서를 출판한 바 있다.

OECD 보고서에서는 뇌과학이 이미 밝혀 놓은 연구 결과뿐만 아니라 현재의 발전 속도를 감안할 때 인지심리학과 교육학, 컴퓨터 과학 등과 함께 인간의 '학습'의 신비를 밝혀 낼 새로운 뇌기반 학습과학의 잠재력을 일깨우고, 이러한 연구결과들을 교육 및 각종 인력 개발 정책의 기초로 삼을 것을 강하게 주장하고 있다. 이들의 정책보고서에서 언급된 뇌의 가소성(plasticity), 뇌발달 시기, 유아의 인지, 정서적 능력 등을 간략히 요약하면 다음과 같다.

첫째, 뇌의 구조에 따른 기능은 사전에 결정된 것이 아니므로 학습과 경험에 의해 변화될 수 있다. 둘째, 뇌 발달시기에 맞추어 적절한 경험과 환경에 노출되면 효율적인 학습이 일어나는 민감기(sensitive period)가 있다. 셋째, 유아 초기에도 추상적인 사고능력이 있으므로 일상심리학(사람에 대한 관심), 일상물리학(사물의 움직임과 상호작용에 대한 관심), 일상생물학(생명체에 대한 관심), 언어 등을 가르쳐야 하는데, 과학을 가르치는 것이 아니라 유아의 관심을 토대로 유아 스스로가 과학자가 되는 기회를 제공하여야 한다. 마지막으로 정서적 능력이 인지과정에 미치는 영향이 중요하므로 학교에서의 정서적 능력을 향상시키는 프로그램을 개발하는 것이 필요하다(OECD, 2002).

뇌기반 학습과학 패러다임

뇌기반 학습과학은 모든 학습은 뇌에서 이루어진다는 대전제 아래 인간의 사고 및 학습 과정에 대한 과학적이고 체계적인 접근방법으로 뇌의 인지기능 및 구조에 대한 과학적 이해를 바탕으로 학습자의 뇌를 효율적으로 활용할 수 있는 적절한 교수-학습환경을 디자인하고자 하는 실용적 목표를 둔 새로운 접근이다(김성일, 2003). 뇌기반 학습과학은 인간의 뇌, 마음, 컴퓨터를 연결하는 학제적이고 과학적인 연구결과를 토대로 보다 효율적인 학습환경을 설계하여 개인에게 최적의 교육환경을 제공하는데 그 의의가 있다.

뇌는 생존과 적응을 위한 최적의 기능을 추구하므로 뇌의 궁극적 본질은 유기체의 생존과 적응에 있다. 또한 뇌의 기능과 구조는 개체의 발달과 종의 진화와 함께 발달하고 진화하지만, 개체의 뇌는 타고난 유전적 특성과 발달과정 동안 환경과의 상호작용 과정을 통해 독특하고 고유한 특성을 지닌다. 뇌의 정보처리기제의 기본 원리는 병렬분산처리(parallel distributed processing), 상향/하향 동시처리, 유형화(patterning)에 의한 의미 중심 처리의 세 가지로 요약할 수 있다(이정모 등, 2003).

Cain과 Cain(1998)은 많은 뇌연구를 학습 과정 연구에 활용하고 학습과학 연구를 도출하기 위한 기초를 마련하기 위해 12가지의 뇌/마음 학습원칙을 분류하였다. 뇌기반 학습과학 관련된 원칙들의 특성은 기존의 전통적인 학습 이론들이 개념의 이해와 기억에 초점을 맞추었던 것과는 달리, 정서와 동기, 그리고 능동적인 의미학습과 다양하고 풍부한 경험을 강조한다는 점이다. 따라서 뇌기반 학습과학에서는 개인 뇌의 고유한 기능의 극대화를 위

해 개별화된 학습, 학습자의 흥미/동기 중심의 학습, 전이를 목적으로 하는 학습, 그리고 사회적 상호작용을 중시하는 커뮤니티 기반 학습에 초점을 맞춘다.

뇌기반 학습과학은 학습자의 생애 초기에서부터 환경에 적응해나가는 뇌의 기능과 특성을 기초로 '학습'을 정의한다. "뇌는 생존을 위해 만들어진 것이지 교육을 위해 만들어진 것이 아니다. 생물체의 본질은 단순하다. 어떤 지능이나 능력도 적절한 환경이 주어지지 않으면 펼쳐질 수 없다. 학습은 뇌가 학습하게끔 자연적(생물적)으로 설계된 그대로 그 방식대로 이루어진다."는 Jensen(2000)의 말에 주목할 필요가 있다. 적응과정으로서의 학습에 대한 이러한 고찰은 학습이 단순히 교실 안에서 이루어지는 텍스트 중심의 암기와 이해뿐만 아니라, 탐구, 발견, 및 발명과 같은 활동임을 의미한다. 나아가서 보다 넓은 맥락으로서의 사회문화적 환경과 연결된 생태학적 관점에서 학습이 접근되고 연구되어야 하며, 그러한 방향으로 학습환경을 설계해야 함을 시사한다.

학습과 관련된 뇌과학 연구와 교육적 함의

인지신경과학 연구를 비롯한 뇌과학 연구가 과연 교육에 어떠한 도움을 줄 수 있을 것인가는 교육심리학자들 사이에서 한동안 논란이 되어왔다(Byrnes & Fox, 1998; Geary, 1998; Mayer, 1998; O'Boyle & Gill, 1998; Schunk, 1998; Stanovich, 1998; Wittrock, 1998). 뇌과학 연구와 교육의 연계에 대해 회의적인 학자들의 주된 비판은 뇌과학 연구가 이미 알고 있는 것을 확인하는 단계에 머무르고 있다는 점과 뇌의 특정영역과 기능과의 상관을 파악하

는 수준이라는 점에 집중되어 왔다. 그러나 최근 뇌영상화 연구들을 살펴보면, 발달, 학습, 기억, 언어, 수학, 사고 과정에 대한 새로운 이해는 물론, 난독증을 비롯한 읽기장애, 연산장애, 발달장애 등의 원인의 파악, 진단과 처방, 중재 프로그램의 효과에 관한 연구에 이르기까지 다양한 연구가 폭발적으로 진행되고 있다. 뿐만 아니라, mirror neuron의 발견(Rizzolatti, Fadiga, Gallese, & Fogassi, 1996)과 마음이론(theory of mind)에 관한 활발한 연구(예, Frith & Frith, 2003)는 타인의 의도를 파악하고 공유된 인지과정에 대한 연구로 관찰학습, 협동학습 및 교수자-학습자 상호작용에 관한 많은 시사점을 제공하고 있다. 또한 지능, 창의성, 정서조절, 상위인지(metacognition) 등에서의 개인차와 동기; 중독, 보상, 의사결정 등에 관한 연구도 많은 진전을 보이고 있어 학습장면에서의 적용가능성이 한층 높아지고 있는 추세이다. 이 논문에서는 학습과 관련된 뇌기능을 발달, 학습, 기억, 읽기, 수학, 사고, 정서, 개인차 등의 영역으로 구분하여 대표적인 논문들을 중심으로 최근의 연구동향을 살펴보고 이러한 연구결과가 시사하는 교육적 함의를 탐색해 보고자 한다.

뇌발달

인간의 뇌는 대략 10^{12} 개의 뉴런을 지니고 있으며 이들 뉴런은 각기 수 많은 수상돌기를 가지고 있으므로 뉴론들 간의 연결을 이루고 있는 총 시냅스 수는 약 10^{15} 개에 이른다(Changeux, 1985). 유아는 태어날 때 대부분의 신경세포를 가지고 태어난다. Chugani(1998)의 연구에 따르면, 신생아의 뇌에서 가장 활발한 영역은 1차 감각운동영역, 대상피질, 시상, 뇌

간, 소뇌, 해마 등이다. 2-3개월이 지나면 두정엽, 측두엽, 1차 시각피질, 기저핵 등에서의 활동이 활발해지며, 6-12개월 시기에는 전두엽의 활동이 증가한다. 4살이 되면 대뇌피질이 성인 뇌의 두배 가량의 포도당을 사용하다가 사춘기가 되면 성인의 수준에 이르게 된다.

생후 5년 동안은 시냅스라 불리우는 신경세포간의 주된 연결이 집중적으로 일어나며 (synaptogenesis), 사춘기까지는 정교한 튜닝 혹은 솜아내기(pruning)가 계속된다. 이후 시냅스의 수는 성인이 동안 동일하게 유지되나 노년기에 접어들면서 점진적으로 쇠퇴한다. 유아나 성인의 시냅스 밀도는 유사하지만 시냅스 연결 패턴을 살펴보면, 유아는 불규칙적으로 연결되어 있는데 반해 성인은 잘 정돈된 모양을 띄고 있다(Huttenlocher, 1979).

이러한 뇌발달 연구결과는 감각운동 체계는 학년전 연령시기에 최적으로 발달하지만, 대뇌피질의 활동은 아동기 후반에서 사춘기 동안, 즉 형식적인 학교교육을 받는 시기에 최적이라는 점을 시사한다. 따라서 고차적 사고와 관련된 기술의 습득을 위해서는 초등학교 시절이 적합하다고 할 수 있다.

미국 NIMH(2004)에서 정상 젊은이의 뇌 영상 자료를 수집하여 분석한 결과, 감각과 운동을 담당하는 가장 기본적인 뇌가 우선 발달하고, 그 다음에 공간과 언어를 담당하는 두정엽이 감각정보의 통합과 추리 및 중앙집행 기능을 담당하는 전전두엽은 가장 늦게 발달하는 것으로 나타났다. 감각 기관내에서도 청각은 시각보다 먼저 발달하지만 점진적으로 성숙하며 시각은 늦게 발달하지만 빨리 성숙한다. 가장 늦게 발달하는 배외측 전전두엽은 중앙집행 기능 억제, 갈등, 목표, 계획, 모니터링, 주의, 자기조절, 작업기억 감시 등의 기능

을 담당한다. 대부분의 뇌발달은 아래에서 위로, 오른쪽에서 왼쪽으로, 그리고 뒤에서 앞으로 일어난다(Berninger & Richards, 2002).

뇌발달에서 신경계 가소성이란 환경의 변화에 대응하여 신경생리학적 수준에서 발생하는 뇌구조와 조직의 변화 능력을 말한다. 60여년 전에 이미 Hebb(1949)이 제안하였듯이 학습할 때 뇌에서 나타나는 변화는 시냅스 기능의 강도가 변화하는 것이므로 특정 정보를 처리하는 과정에서 특정 신경 다발들 간의 흥분이나 억제 기능이 신경회로를 구성하게 된다. 이때 동기화된(synchronized) 신경통로는 반복되는 시냅스의 자극에 보다 효율적으로 반응하게 된다.

뇌발달이 환경의 영향을 받는 예는 뇌손상 환자의 경우에서 자주 관찰된다. 뇌 손상시기가 이른 경우에는 다른 뇌영역이 손상된 영역의 기능을 담당하여 정상적인 기능을 회복한다. 청각장애인의 경우에는 수화를 사용할 때 정상인의 언어중추에 해당하는 뇌의 활성화가 관찰되었으며(Neville & Bavelier, 1998), 시각장애인의 경우 점자를 읽을 때 시각중추가 활성화되었다(Roder et al., 2002). 이러한 결과는 특정 뇌의 영역이 특정 기능과 관련은 있으나 이러한 뇌기능은 환경의 영향에 따라 가변적일 수 있다는 것을 의미한다.

최근의 연구들은 이러한 가소성이 아동기 발달에만 국한되는 특성이 아니라 성인기까지 계속된다는 증거를 제시하기 시작하였다. 예를 들어 Maguire 등(2000)은 영국 런던의 택시 운전기사의 뇌와 택시를 운전하지 않는 일반인의 뇌를 비교한 결과, 택시 운전기사의 해마가 일반인보다 큰 것으로 나타났으며, 해마의 크기는 택시기사로 일한 기간과 정적인 상관을 보였다. 이러한 결과는 공간적 표상을

정교화하여야 하는 성인의 경우에 나타나는 뇌의 가소성을 보여주는 예이다. 또한 Pantev 등(1998)은 다른 예는 전문음악가의 청각피질의 크기가 일반인에 비해 25%가량 클 뿐만 아니라 음악을 시작한 나이가 어릴수록 청각피질이 큰 것으로 나타났다.²⁾

학습

모든 학습은 뇌에서 이루어진다. 주로 동물 연구를 통해 밝혀진 환경과 뇌신경세포의 발달 관계에 관한 연구는 풍요한 환경이 뇌신경세포들의 수상돌기 수, 모양의 변화, 및 혈관의 두께 변화 등을 가져와 대뇌피질을 더욱 두껍게 만든다는 사실을 밝혀냈다(예, Diamond & Hopson, 2002).

학습은 새로운 것에서 익숙한 것으로의 전이를 말하는 것으로 학습의 초기에는 우반구가 주로 관여하고 학습이 어느 정도 진행된 이후에는 좌반구가 주도권을 쥐게 된다. 새로운 자극이나 대상은 주로 우반구에서 처리되고 익숙한 대상은 좌반구에서 처리된다. 일반적으로 얼굴재인과정에서 결함을 보이는 실인증(prosopagnosia)이나 음악재인과정에서 결함을 보이는 실음악증(amusia) 환자의 경우 우반구의 손상에 기인하는 것으로 알려져 있으므로(예, Patel, Peretz, Tramo, & Labreque, 1998), 얼굴재인과 음악재인(멜로디의 재인)은 주로 우반구

에서 담당하는 것으로 여겨진다. 그러나 몇 가지 예외적인 경우가 보고되고 있는데 전문음악인과 음악초보자의 뇌 활성화 패턴을 비교한 결과, 초보자는 주로 우반구가 활성화되는데 반해 전문가는 좌반구가 활성화되는 것으로 나타났다(Lotze, Scheler, Tan, Braun, & Birbaumer, 2003). 또한 얼굴실인증 환자의 경우에서도 희미한 얼굴은 우반구에서 처리하는 반면 익숙한 얼굴은 좌반구에서 처리하는 것으로 나타났다(예, De Renzi, Perani, Carlesimo, Silveri, & Fazio, 1994). 이러한 연구 결과는 언어적/시각적 자극 모두에서 보편적으로 나타나는 현상으로 복잡한 과제나 운동학습과제, 그리고 컴퓨터 게임 등에서 일관성 있게 발견되고 있다. 즉 동일 자극을 반복해서 제시받거나 지속적으로 연습을 하게 되는 경우에는 우반구에서의 활성화 패턴이 사라지고 좌반구에서는 동일한 양의 활성화가 유지된다.

컴퓨터 게임이나 체스와 같은 복잡한 사고를 요구하는 과제를 하는 동안 전문가의 뇌와 초보자의 뇌를 비교하는 연구를 살펴보면, 전문가들은 초보자에 비해 일관되게 뇌의 활성화가 적은 것으로 나타났다. 체스선수의 뇌 활성화를 살펴본 PET 연구결과에 따르면 초보 체스선수가 더 많은 혈당을 사용하여 좌 반구를 단계적으로 사용한 반면, 전문 체스선수는 더 적은 혈당을 사용하면서 우반구에서 총체적인 패턴을 보였다(Nichelli et al., 1994). 이러한 결과는 초보자의 경우 적절한 처리 영역을 찾지 못해 불필요한 영역을 활용하기 때문이거나 반복된 연습의 부족으로 자동화되지 못한 의식적인 처리를 반영하는 결과일 수도 있다. 우리는 뇌의 많은 부분을 활용하지 못하고 있다면서 아쉬워하지만, 역설적으로 뇌의 적은 부분을 활용한다는 것은 (그럼에도 불구하고

2) 이러한 연구가 상관연구이기는 하지만 해마가 큰 사람이 택시운전을 한다고 추리하기 어렵고 운전을 한 기간과 해마의 크기가 상관 높고, 음악의 경우 음악을 한 기간과 청각피질의 크기가 상관 높음 것으로 보아 청각피질이 큰 사람이 어릴 때부터 음악을 시작했다고 추리하기는 어려우므로 인과관계로 해석하는 것이 타당할 것이라 생각된다.

하고 동일하거나 월등한 수행을 보이는 경우 그 만큼 능력이나 전문성이 뛰어난 것이라 해석할 수 있다. 전문가일수록 반복적인 훈련과 경험으로 인해 뇌 신경세포의 수상돌기가 많아지고 길어지므로 시냅스 간격이 좁아지게 되고 이로 인해 신속하고 효율적인 반응을 하게 된다. 따라서 전문가는 제한된 뇌 영역을 사용하여 뇌의 나머지 부분을 더 효율적이고 생산적으로 사용한다고 볼 수 있다.

학습에 있어서 반복과 연습이 중요한 이유가 반복적인 경험이 뇌신경 회로의 동기화를 유발하여 궁극적으로는 뇌를 효율적으로 사용하고자 하는데 있다(Hebb, 1949). 그렇다면 교과과정을 구성할 때 학습의 깊이가 범위보다 반드시 우선적으로 고려되어야 할 것이다(Geak & Cooper, 2003). 정보의 과잉은 실제적인 연습과 경험을 제한하므로 신경회로의 효율적 연결을 어렵게 하므로 새로운 내용을 학습할 때에는 다소 시간적인 여유를 가지는 것이 중요하다. 그러나 동일한 내용의 기계적인 반복이나 암기는 전이를 어렵게 하고 학습자의 흥미를 감소시키므로 유사한 학습내용을 다양한 맥락에서 다양한 활동(실험, 프로젝트 수행, 토론, 매체의 활용, 현장학습, 협동학습)을 통해 경험하도록 하는 것이 중요하다.

기억

Cabeza와 Nyberg(2000)은 기억과 관련된 275개의 PET와 fMRI 연구를 개관한 결과 (1) 주의와 작업기억은 전전두엽과 두정엽이 담당하고 있으며, 언어와 의미기억의 인출은 좌뇌의 전전두엽과 측두엽이 담당하고 있다. (2) 일화기억의 부호화 과정에는 좌뇌의 전전두엽과 내측 측두엽이 관여하는 반면, 일화기억의 인

출과정에는 전전두엽, 내측 측두엽, 그리고 후중간핵(posterior midline)이 담당하고 있는 것으로 나타났다. (3) 그리고 지각적 점화과정에는 선조체외(extrastriate) 영역이, 개념적 점화과정에는 전전두엽이 각각 관여하고 있으며, 절차적 기억은 운동영역과 비운동영역 모두 활성화되는 것으로 나타났다(기억의 뇌기능에 관한 자세한 논의는 김성일, 2004 참조).

작업기억에 관한 최근의 뇌영상 연구결과를 종합해 보면, 복외측 전전두엽은 주로 유지(maintenance)의 기능을 담당하는 반면, 배외측 전전두엽은 이미 유지된 정보에 가해지는 조작(manipulation)을, 전대상회는 중앙집행장치와 관련된 기능(목표 및 산출결과 유지 등)을 담당하는 것으로 요약할 수 있다. 작업기억과는 달리 장기기억 중에서 의미기억의 인출과 관련된 영역은 전전두엽, 측두엽, 그리고 전대상회와 소뇌 영역 등이다. 이 중에서도 좌반구 전전두엽의 관여가 일관되게 관찰되는데, 자극의 양태가 언어자극이 아닌 비언어적 자극인 경우조차도 마찬가지이다. 이처럼 기억은 유형과 기능에 따라 뇌의 여러 영역에서 분산되어 처리되는 역동적인 과정임을 알 수 있다.

기억의 문제를 각 기억유형과 관련된 뇌구조에서만 국한해서 이야기해서는 곤란하다. 기억을 잘 못하는 것처럼 보이는 많은 현상이 실제로는 기억을 담당하는 뇌구조의 문제가 아니라 다른 기능의 문제일 수 있기 때문이다. 작업기억의 용량이 동일하더라도 기억수행에서 차이가 나는 것은 단순저장 용량으로서의 작업기억이 아니라 계획하고 모니터링하는 작업기억 혹은 상위인지 능력의 차이에 기인할 가능성이 높다. 서투른 일을 하게 할 때, 작업기억의 용량을 대부분 차지함으로 제대로 익힌 기술이나 사고를 표현하지 못하게 되는 경

우가 종종 있기 때문이다.³⁾ 따라서 학습자가 과제를 수행 때의 뇌활동 패턴과 기타 행동적 자료와의 관계를 종합하여야만 학습자를 문제를 정확히 진단하고 학습자에게 적절한 가이드를 할 수 있을 것이다.

각 기억 유형에 대한 뇌회로와 기능적 신경망이 밝혀짐에 따라 실제 학습내용과 활동 및 과제의 유형에 따른 학습자의 기억과정을 밝혀낼 수 있는 가능성이 한층 높아졌다고 할 수 있다. 현재 각급 학교에서 이루어지고 있는 교육이 한 가지 유형의 기억만을 지나치게 강조하고 있지는 않은지, 사고력 훈련이나 절차적 지식과 관련된 교과에서 일화기억만을 강조하고 있지는 않은지 등의 물음에 답하기 위해 학습과정 동안 실제 뇌활성화를 살펴보면 많은 시사점을 찾을 수 있을 것으로 생각된다. 나아가서 각 교과와 학습내용을 기억의 유형에 맞추어 재분류하고 총체적인 기억발달을 위한 교육과정이 설계되어야 하며 이를 위한 효과적인 교수법 역시 뇌기반 학습과학적 연구를 통해 제안되어야 할 것으로 생각된다.

읽기

언어산출과 이해에 관한 기초연구는 상당한 진척을 이루고 있으나 언어학습과 관련된 뇌과학 연구는 읽기장애와 외국어 학습 분야에 집중되고 있다. 언어처리와 관련된 수많은 뇌

영상 연구에서 비교적 일관되게 나타나는 결과는 언어처리의 주영역이 좌반구 중에서도 측두엽에 집중되어 있다는 사실이다. 언어처리 중 문자와 철자처리는 좌반구의 후두엽과 측두엽 및 두정엽과 관련이 있는 반면(Pugh et al., 2001), 음운처리는 측두-두정엽(temporo-parietal junction)과 관련이 깊은 것으로 밝혀졌다(Simos et al., 2002). 그러나 난독증(dyslexia)과 같은 읽기장애를 보이는 아동과 청소년은 이러한 결손을 보완하기 위해 읽기 도중에 우반구를 많이 사용하며(Shaywitz et al., 2002), 음운 과제수행시 후측두엽의 활성화가 줄어들고 전두엽의 활성화가 증가하는 것으로 나타났다(Brunswick et al., 1999). 발달적 난독증⁴⁾ 아동들이 일정 기간 동안 음운기술 훈련과 철자-소리 변환 훈련을 받은 후에는 우반구의 활성화가 현저하게 줄어들고 좌반구 측두엽과 두정엽 영역의 활성화가 정상화된 것으로 관찰되었다(Simos et al., 2002; Temple et al., 2003). 이러한 연구결과는 발달적 난독증 아동의 읽기능력 손상과 관련된 원인의 진단, 치료방법, 치료효과 검증 등에 매우 유용한 자료가 되고 있음을 보여 주고 있다(Goswami, 2006; Katzir & Pare -Blagoev, 2006). 실제로 발달적 난독증의 원인은 개인차가 심하므로 이들의 근본적 문제를 진단하고 이를 조기에 발견하여 문제의 원인에 따라 개인에 적합한 치료와 훈련프로그램을 제공하는 것이 중요하다.

또한 외국어 습득에 관한 Kim 등(1997)의 연구결과에 따르면, 아동기에 제2외국어

3) 실제로 시사적인 문제에 관한 토론에서는 뛰어난 통찰력과 사고력을 보여 주던 학생이 자신의 생각을 글로 작성한 것을 보면 어이없게도 몇학년 아래의 학생수준인 경우가 있다. 이 경우 학생은 철자를 정확히 쓰는데 너무 많은 노력을 기울여 작업기억의 공간이 남지 않기 때문에 자신의 사고를 명료히 하거나 창의적으로 표현할 수 없는 것으로 해석할 수 있다.

4) 발달적 난독증은 정상적인 지능수준과 교육기회를 가지고 있음에도 읽기를 학습하는 능력이 결여된 경우로 그 원인이 시각처리, 음운처리, 안구운동, 기억처리 등의 다양한 처리에서의 문제에 기인할 수 있는 것으로 알려져 있다.

습득한 사람은 모국어와 외국어 처리동안의 Broca영역 내에서 활성화되는 부분이 동일한 것으로 나타난 반면, 성인기에 외국어를 습득한 사람은 모국어와 외국어의 처리영역이 구분되어 있다는 사실을 발견하였다. 이러한 결과는 외국어 교육이 여러 가지 중요한 의미를 지니는 국내의 현실과 관련하여 많은 시사점을 제공할 수 있을 것이라 여겨진다. 예를 들어, 외국어 학습에서 필요한 각 기술(예, 발음, 문법, 읽기, 말하기, 쓰기 등)을 습득하는 적절한 시기에 관한 시사점을 제공할 수도 있으며, 언어학습 분야에서 논란이 되고 있는 음운(phonics)교육과 총체적 언어(whole language) 교육방법의 효과성을 비교 검증하는데에도 많은 도움을 줄 수 있으리라 기대된다(자세한 논의는 Shaywitz & Shaywitz, 2004 참조).

수학

수학적 개념과 관련된 인지신경과학적 연구는 Dehaene과 그의 동료들의 연구가 대표적이다(Dehaene, 1997; Dehaene et al., 1999). Dehaene 등(1999)은 수학적 연산과 관련된 세 개의 하위체계를 구분하여 제안하였다. 수의 크기를 판단하는데 사용되는 양적 체계는 두정간구(intra-parietal sulcus)에서, 수의 언어적 명칭이나 수와 관련된 사실을 저장하기 위해 사용하는 언어 관련체계는 실비우스(perisylvian) 영역에서, 그리고 시공간적 정보는 방추회(fusiform gyrus)영역에서 각각 담당한다. 그러나 이러한 주장에 상반되는 연구결과(예, Presenti, Thioux, Seron, & De Volder, 2000)도 제기되고 있어 아직 확실한 결론에 도달하기는 이르지만 수학 역시 나름대로의 문법과 의미를 지니고 있다고 가정하면 시간경과에 따른 연구방법을 적

용해 볼 수도 있을 것이다.

Dehaene은 우리의 뇌가 수의 크기를 판단할 때는 심적 수직선 표상을 사용하여 비교하고 이러한 표상은 수 언어표상(예, 이십 삼)나 숫자 표상(예, 23) 모두 공통적으로 관여한다고 주장하였다. 뇌 영상화 연구 결과는 수의 크기를 비교하는 과제에서는 수의 표현양식에는 관계없이 양 반구의 두정엽과 후두엽이 활성화되는 것을 관찰하였다(Le Clec'H et al., 2000; Pinel et al., 2001). 수 비교와는 별개로 두정엽은 근사값 추정(numerical approximation)에서도 중요한 역할을 한다. 덧셈문제에 대한 정확한 답보다는 대략의 답을 추정하는 과제에서 수 비교와 유사한 두정엽 영역에서의 활성화가 관찰되었으며 시각피질 역시 활성화된 것으로 나타났다(Dehaene, 1999).

Zago 등(2001)은 두 자리 숫자의 덧셈, 뺄셈, 곱셈이나 나눗셈과 같은 간단한 연산을 하는 동안에는 좌반구의 두정엽 부위의 활성화를 관찰하였는데, 이는 손가락을 이용한 숫자 세기와 관련이 있다고 주장하였다. 발달적인 측면에서 모든 인간은 셈을 배울 때 손가락으로 셈하는 전략을 사용하는 사실로 보아 좌반구 두정엽의 활성화는 운동과 관련된 전두엽의 활성화와 상관이 있으며, 이러한 연구 결과는 발달과정 동안의 초기 학습의 흔적이라 볼 수 있다. 그러나 세 자리 수 이상의 연속적이고 복잡한 연산을 하는 경우에는 전두엽과 두정엽의 아래부위가 활성화되었다(Gruber et al., 2001; Menon et al., 2000). 다소 복잡한 계산과 관련된 전두엽에서 두정엽에 이르는 네트워크의 국제화와 상호작용에 대한 연구는 시공간적 작업기억의 관여, 언어적인 전략의 사용, 그리고 문제해결과 관련된 목표유지 등이 혼입될 가능성이 크므로 보다 체계적인 연구가

필요할 것으로 생각된다.

간단한 연산 과정을 처리할 때의 뇌 활성화 패턴을 사건관련 fMRI로 연구한 Menon 등(2002)의 연구에 따르면, 2자리 숫자에 비해 3자리 숫자의 덧셈과 뺄셈을 하는 동안의 우반구의 각회(angular gyrus)와 두정간구가 활성화된다. 그러나 올바른 연산 공식을 처리할 때(예, $2+2=4$)와 비교해서 잘못된 연산 공식(예, $2+2=5$)을 처리할 때 활성화되는 뇌 영역은 좌반구 배외측(dorsolateral) 및 복외측 전전두엽(ventrolateral prefrontal)이다. 이러한 결과는 잘못된 연산을 처리하는 동안 부가적인 처리가 발생한다는 것을 의미한다. 만약 부가적인 처리가 재계산이나 재분석이라면 연산과정과 관련이 깊은 두정엽 영역(각회와 두정간구)이 활성화되어야 하는데 이러한 결과는 관찰되지 않았다. 반면 작업기억과 관련이 있는 배외측/복내측 전전두엽이 활성화된 것으로 보아 잘못된 답을 수정하기 위해 암산된 결과를 저장한다는 점을 시사한다.

Dehaene 등(2004)은 다양한 수학적 연산과제를 수행하는 동안의 뇌 활성화 연구결과를 토대로 수학적 정보처리 모형을 제안하고, 이러한 회로에서 각 세부기능을 담당하는 뇌 영역을 밝혀내었다. 예를 들면, 수의 양적 표상은 좌우 두정간구가 맡고 있으나 언어적 표상은 좌반구 각회가 담당하고 있으며, 암산의 경우 하측 전전두엽이 담당하고 있다. 만약 정상적인 계산의 어려움을 보이는 연산장애(dyscalculia) 학습자의 경우, 연산과제 수행 중 각 뇌영역에서의 보이는 활성화 패턴을 관찰함으로써 그 원인을 진단하고 효과적인 치료나 훈련프로그램을 제공할 수 있을 것으로 기대된다(Ansari & Karmiloff-Smith, 2002).

사고와 상위인지

인간의 고차적 사고와 가장 밀접한 관련이 있는 기능은 중앙집행기능(central executive function)이다. 정보처리 모형에서 가정하는 중앙집행 처리장치에서는 주의집중, 자극의 선택과 처리의 우선순위 결정, 목표와 계획의 유지, 동기적 조절 등의 정보처리와 관련된 총체적 기능을 담당하는 것으로 간주한다. 이러한 집행기능 중에서도 가장 중요한 기능은 상위인지(metacognition) 기능이다. 상위인지란 인지, 정서, 및 동기 처리와 관련된 뇌 영역으로부터 정보들을 수합하여 정보처리 과정을 조절하는 기능을 담당한다. 세부적인 과정으로는 계획, 모니터링, 전략사용, 및 평가 등으로 구성된다.

상위인지는 사고, 기억 및 행위에 대한 의식적이고 수의적인 조절기능을 말한다. 이러한 상위인지는 선택적 주의를 비롯하여 갈등 해결, 실수탐지 및 억제조절 등의 중앙집행 통제과정에 해당한다. 이러한 기능은 주로 대뇌피질의 전전두엽이 관여하는 것으로 알려져 있는데, 이 영역은 추리와 추상적 문제해결 등의 고차적 사고를 담당하는 것으로도 알려져 있다. 그러나 또다른 인지신경과학적 연구에 따르면 정서적 조절과 인지적 조절에 관여되는 대뇌피질 영역 역시 전대상피질(anterior cingulate cortex; ACC)이나 안와전두엽(orbitofrontal lobe)으로 밝혀졌다(Fernandez-Duque, Baird, & Posner, 2000; Shimamura, 2000). 만약 정서적 조절과 인지적 조절이 동일한 대뇌 영역의 활성화를 수반한다면, 상위인지의 개념은 인지적 조절과 정서적/동기적 조절을 모두 포함하는 자기조절(self-regulation)의 개념으로 확장될 수 있는 구인임을 시사한다.

학습과 정서

기억과 학습에 있어서 정서가 미치는 영향은 이미 잘 알려져 있다. 학습과정에서 발생하는 스트레스, 불안, 공포 등의 정서는 인지과정뿐만 아니라 사회적 판단에도 많은 영향을 미친다. 한 예로, 학습 시에 스트레스를 느끼면 위협에 대한 심리생리학적 반응이 나타나는데, 무기력감이나 피로감을 수반한다. 이러한 부정적 정서경험이 학습자로 하여금 고등 사고나 창의적 사고를 필요로 하는 문제해결 상황이나 학습상황을 회피하도록 만든다. 실제로 우울증 환자는 정상인에 비해 해마의 위축을 보이며 의사결정이나 계획 등의 고차적 사고와 관련이 있는 전두엽의 활동이 적다(예, Sheline, Sanghavi, Mintun, & Gado, 1999).

스트레스가 높은 상황에서는 정보를 시상과 편도체를 통해 대뇌에 전달한다. 이 경우 고립된 사실들을 암송하는데에는 별 문제가 없지만 복잡하고 창의적인 사고는 어렵게 만든다. 따라서 탐구에 필요한 고차적 사고를 유도하기 위해서는 스트레스를 낮추는 것이 필수적이다. 학습자의 주된 스트레스원이 평가 상황에서 온다는 점을 고려한다면, 공개되거나 타인과 비교되지 않은 상황에서 학습자의 심리적 스트레스 수준을 낮추는 새롭고 다양한 유형의 평가 방식이 개발되어야 한다. 그러나 스트레스가 없는 학습환경이 반드시 효율적인 것만은 아니다. 학습내용이 복잡하고 새로운 것일 때에는 낮은 스트레스 상황이 바람직하지만, 간단한 과제의 연습이나 반복은 약간의 스트레스 상황에서 더 수행이 높다(Jensen, 2000).

학습상황을 위협적이고 통제적인 것으로 지각할수록 학습은 효율적으로 일어나지 않는다

(LeDoux, 1996). 긍정적인 정서는 학습과 기억을 촉진시키며 뇌는 경험한 내용이 유용하다고 판단되는 경우 학습한 내용을 잘 기억하는 경향이 있다. 반면에 학습자의 통제권이나 선택권이 있는 자율적인 상황에서는 비록 스트레스가 높더라도 편도체를 경유하지 않고 고차적 사고를 담당하는 다른 경로를 경유하므로 별다른 문제가 없다. 긍정적인 정서는 전두엽과 전대상회의 활성화를 촉진시키고 도파민의 분비를 촉진하여 고차적 인지기능의 향상을 야기한다(자세한 내용은 Ashby, Isen, & Turken, 1999 참조). 따라서 정서적인 지원이 풍부한 학습환경은 학습자의 긍정적 정서를 수반하여 기억과 언어 능력, 사고의 유연성, 의사결정, 창의적 문제해결 및 사회적 상호작용의 증진을 가져온다(Caine & Caine, 1997). 효율적인 학습은 정서를 매개로 이루어진다. 정서는 단순히 학습의 부가적인 배경이 되는 것이 아니라 목표나 신념, 가치, 기대 및 편향 등과 관련되므로 학습동기의 발생여부를 결정짓기도 한다.

전통적으로 정서와 인지는 독립적 개념으로 간주되어 왔으며, 정서와 인지의 상호작용에 있어서도 독립된 뇌 구조간의 상호작용으로 여겨져 왔다. 한 가지 예를 들면, 해마를 제외한 변연계는 정서를 담당하고, 기타 고차적인 인지기능은 전전두피질이 담당한다고 생각되었다. 그러나 최근의 정서신경과학적 연구결과에 따르면, 인지과정과 관련된 뇌 회로망과 정서와 관련된 뇌 회로는 부분적으로 중복되며 전전두엽에서는 정서적 정보와 인지적 정보가 수렴된다(Damasio, 1989; Davidson, 2000). 예를 들면, 작업기억이나 미래계획과 관련이 있다고 알려진 배외측 전전두엽(dorsolateral prefrontal cortex)은 공포와 행복과 같은 정서와

도 관련이 있는 것으로 밝혀졌다(Davidson, 1998). 미래의 사건을 기대하는 기제는 공포와 행복의 정서가를 계산하는 기제와 일치한다고 볼 수 있다. 즉 공포는 불확실한 유관을 기대할 때 발생하며, 행복은 미래의 긍정적 결과를 기대할 때 발생한다. 한편, 편도체는 공포를 비롯한 여러 정서를 담당하는 변연계의 뇌 영역으로 알려져 있지만, 편도체 역시 감각, 지각 및 선택적 주의과정에 중요한 역할을 하는 것으로 밝혀졌다(Morris et al., 1998).

이러한 연구결과가 시사하는 점은 동일한 뇌 영역이 정서와 인지 각각의 기능을 모두 담당하는 이중적 역할을 한다는 것이다. 인지 혹은 정서적 기능만을 배타적으로 담당하는 뇌 영역은 없다고 볼 수 있다. 따라서 정서와 인지를 통합된 하나의 시스템으로 간주하는 접근방법이 필요하다. 정보처리 패러다임에서는 학습과정에서 인지적 기능의 중요성에 많은 관심을 가져왔으며, 그 결과 많은 교수/학습 방법이 학습자의 인지적 능력의 향상에만 초점을 맞추어 왔다. 그러나 학습의 효율성을 높이기 위해서 인지적 기능만을 강조하는 교수/학습 접근에는 한계가 있다. 학습과정에서 발생하는 학습자의 부정적 정서(공포, 열등감, 수치심, 불안 등)를 최소화하고 긍정적 정서(행복감, 자신감, 유능감 등)를 유발하는 학습 환경을 조성하는 것이 학습자의 인지적 기능을 극대화하는 길이다.

한편 Ochsner, Bunge, Gross, Gabrielli(2002)는 실험참가자가 긍정/부정 정서에 대한 반응을 조절하라고 요구받을 경우 전대상회가 활성화 되는 것을 관찰하였다. Posner와 Rothbart (2005)는 이러한 정서적 조절을 담당하는 전대상회가 주의를 조절하는 기제이므로 주의력 훈련이 정서조절능력 향상에 도움이 될 수 있을

것이며, 나아가서 만족의 지연, 타인에 대한 공감, 및 양심의 발달 등과도 관련이 있을 것이라 주장하였다. 실제 동물연구에서의 인지적 훈련이 공격성을 감소시킨다는 연구결과도 있기는 하지만 이러한 주장은 보다 세밀한 검토와 설득력있는 증거가 요구된다.

학습에서의 개인차

학습과 관련된 특정 인지적 기능을 담당하는 신경회로가 모든 사람에게 공통적으로 존재한다는 증거들이 많기는 하지만, 개인의 뇌는 매우 독특하므로 이러한 신경회로의 효율성에 영향을 주는 개인적 특성이 있다. 학습 장면에서 가장 많이 고려되는 개인차 특성 중의 하나가 지능이다. 추상적인 추리과제를 해결하는 과정에서 지능이 높은 사람과 낮은 사람은 뇌 활성화 패턴에서 차이가 난다. 지능이 낮은 사람들의 경우 뇌의 많은 영역이 활성화되는 것을 보여 주는 반면, 지능이 높은 사람들은 상대적으로 적은 뇌활성화 양상을 보였다(Haier et al., 1988). 이러한 연구 결과는 지능과 뇌의 활성화 패턴과 역상관이 있다는 것을 보여주는 것으로 과제가 어렵지 않은 경우에는 높은 지능을 가진 사람이 뇌를 더 효율적으로 사용한다는 점을 시사한다. Haier와 Benbow(1995)는 PET을 사용하여 수학 SAT 성적이 높은 남녀 학생이 수학 과제를 수행하는 동안의 뇌 활성화 패턴을 보통 학생과 비교한 결과, 수학성적이 보통인 경우에는 남녀의 차이가 뚜렷하지 않지만 수학성적이 높은 경우에는 남학생이 여학생에 비해 측두엽이 부가적으로 활성화되는 것으로 나타났다. 그러나 일반적으로 높은 SAT 수학성적을 얻은 여학생의 비율이 남학생에 비해 상대적으로 낮은 관

계로 연구에 참여한 여학생들이 언어적 특성에서도 매우 뛰어난 학생이었기 때문에 이러한 결과가 나타났을 가능성을 배제할 수 없다.

영재와 일반 청소년의 뇌활성화를 비교한 대부분의 연구에서 공통적으로 발견되는 현상은 영재가 양쪽 반구의 두정엽, 전두엽, 그리고 전대상회에서의 활성화가 상대적으로 크다는 점이다(Haier, Jung, Yeo, Head, & Alkire, 2004; Lee et al., 2005; O'Boyle et al., 2005). 예를 들어, O'Boyle, Benbow, 및 Alexander (1995)의 뇌파 연구에서 영재는 일반 학생보다 우반구와 전두엽에서 강력한 알파파가 관찰되었으며 반구간의 상호작용이 매우 빠르고 활발한 것으로 나타났다. 또한 Duncun(2003)의 연구결과에 따르면, 유동적 지능(gF; general fluid intelligence)이 높은 실험참가자가 낮은 참가자에 비해 전대상회와 외측 전전두엽의 활성화가 많은 것으로 나타났다. 과제의 양태와 관계없이 나타나는 이러한 뇌활성화 패턴은 작업기억, 중앙집행능력 및 주의력 등의 일반적 정보처리 능력의 차이로 여겨진다.

한편, 남녀의 성차나 연령의 차이 역시 지속적으로 연구되고 있는 분야이다. Shaywitz 등(1995)의 언어연구에서는 동일한 음운 처리 과정동안 남녀의 대뇌반구의 편재화를 비교한 결과, 여성의 경우 좌우반구를 모두 활성화시키는 반면, 남성은 좌반구의 편재화가 심하게 나타나는 것으로 발견되었다. 이와 같은 개인차 연구는 언어의 성차를 넘어서 주의력, 쓰기, 읽기, 셈하기, 이해, 문제해결 등에서 장애를 보이는 학습자들과 정상수행을 보이는 학습자들 간의 뇌 기능차이의 비교를 통해 장애의 원인을 파악하는데 많은 기여를 할 수 있을 것이다. 또한 특정 학습방법과 교수방법을 사용한 후의 뇌활성화 패턴을 사용하기 전의

패턴과 비교하여 그 효과성 정도를 파악할 수도 있을 것이다. 뇌연구 결과의 교육적 활용을 위해서는 특정 과제 수행에서의 성취도가 높은 학생과 낮은 학생들의 뇌 활성화 영역을 비교하거나 특정영역에서의 전문가와 초보자의 뇌 활성화 차이를 비교하는 방식의 연구를 통해 효율적인 학습방법이나 교수방법에 대한 구체적인 제안을 할 수 있어야 할 것이다.

신경계에 대한 신화(Neuromyths)

연구자들에 의해 검증되지 않은 사실이나 잘못 전달된 오개념 혹은 결과에 대한 과잉일반화나 해석상의 오류 등으로 인해 발생하는 뇌에 대한 잘못된 고정관념을 신경계에 대한 신화적 사고라 한다(OECD, 2002). 이러한 신경계에 대한 신화적 사고가 자녀 교육에 대한 부모의 과잉욕구와 맞물리게 되면 실제 엄청난 사회적 문제를 야기할 수 있으므로 매우 유의하여야 한다. 교육장면에 적용할 수 있는 뇌신경과학적 연구결과의 축적을 위해서는 엄밀한 검증이 필요함에도 불구하고, 현실에서는 단편적인 연구결과를 상업적으로 이용되는 경우가 빈번하며, 학문적 성과를 과장하거나 특정 이데올로기를 지지하는 수단으로도 이용되는 등 많은 혼돈을 야기하고 있다. 그러므로 뇌에 관한 보다 정확한 이해와 신중한 자세가 필요하다. 이 절에서는 뇌와 관련된 신화 중에서 가장 많이 만연되어 있는 세 가지 신화인 뇌의 편재성, 결정적 시기, 풍요로운 환경에 대한 잘못된 믿음과 올바른 의미를 살펴보고자 한다.

좌우반구 편재성(laterality)

가장 오래되고 보편화된 신화중의 하나인 좌우반구 편재성은 좌우반구가 근본적으로 다른 방식으로 작용한다는 것이다. 좌반구는 언어와 논리적 기능을 담당하는 반면 우반구는 언어보다는 심상과 관련이 있는 직관과 창의성을 주관하는 영역이라는 지나치게 단순화된 생각이다. 이러한 좌우반구의 특성은 주로 분할뇌 환자의 연구를 통해 밝혀졌으나, 인간의 뇌 기능은 분산되어 있을 뿐만 아니라 통합적으로 기능하므로 정상인의 경우에는 대부분의 과제 수행에서 좌우반구가 모두 활성화된다(OECD, 2002). 다만 연구목적에 따라 동일한 과제 수행시 좌우반구의 활성화를 비교하는 경우, 각 반구의 상대적 우세성이 나타나기도 하지만 실제로는 좌우반구를 모두 사용한다고 보는 것이 옳다. 좌우반구의 기능은 비대칭적이기도 하고 특정 과제수행에서 더 우세한 반구가 있고 더 효율적으로 처리하기는 하지만 이 모든 것이 상대적이다. 예를 들어, 언어산출의 경우에는 좌뇌가 우세하고 시공간적 과제를 수행할 경우 우뇌가 상대적으로 우세하지만, 실제 이 두 과제의 수행에서는 좌우반구를 모두 사용한다.

결정적 시기(critical period)

결정적 시기란 특정 자극에 노출되어 학습이 용이하게 일어날 수 있는 시기를 말한다. 이 시기를 놓치게 되면 학습이 어렵거나 불가능해진다. 생후 처음 3년이 뇌 발달에서 매우 중요하다고 믿는 사고는 동물의 감각체계 발달 연구결과에서 비롯된 듯하다. 고양이의 시각박탈 실험결과(Wiesel & Hubel, 1965)나 원

숭이의 뇌발달이 생후 3-4개월에서 최고조에 달한다는 연구결과(Goldman-Rakic, 1987)가 있기는 하지만, 이러한 결과를 인간에게 그대로 적용하기는 어렵다. 인간의 학습에는 이처럼 확고한 결정적 시기가 거의 없는 것으로 알려져 있다. 게다가 시냅스를 많이 형성하면 최적의 학습이 일어난다는 인과관계가 증명되지 않았기 때문에 최근 신경과학자들은 결정적 시기라는 용어보다는 민감기 혹은 최적기라는 용어를 더 선호한다. 인간의 경우에도 언어만큼은 민감기가 있는데 주로 음운과 문법 숙달의 경우 10대 초기까지가 민감기로 알려져 있다. 그러나 어휘와 의미는 이러한 민감기의 영향을 전혀 받지 않으므로 이러한 두 언어체계가 상이한 뇌신경 회로를 사용할 가능성이 높다(OECD, 2002). 민감기의 영향을 받는 말하기는 뇌의 진화과정에서 조건화된 반응양식이지만 읽기는 경험의존적인 문화적 학습이므로 민감기의 영향을 덜 받는 것으로 알려져 있다(Greenough, Black, & Wallace, 1987). 따라서 ‘아동들은 실제 보여주는 능력보다 더 큰 능력이 있으므로 3세 이전의 교육이 매우 중요하고, 따라서 새로운 교육적 프로그램을 개발하여 3세 이전의 아동에게 적용하면, 일단 개발된 지능이 성인기까지 지속될 것’이라는 믿음은 대단히 위험하다(Bruer, 1997).

풍요로운 환경(enriched environment)

쥐에게 풍요로운 환경과 박탈된 환경을 제공한 Diamond 등(1987)의 유명한 실험결과에서 비롯된 신화적 사고 중의 하나는 아동에게 풍성한 환경을 제공해 주면 지능이 발달하고 학습능력이 향상된다고 믿는 것이다. 그러나 이들이 발견한 사실은 풍요로운 환경이 뇌의 시

냅스 밀도를 높였다는 사실뿐이지 시냅스 밀도와 지능 및 학습능력과의 관계는 아직 명확하게 밝혀지지 않은 상태이다. 또한 초기의 시냅스 밀도가 나중에도 영향을 주는지에 대해서도 알려진 바가 없다. 한편 다른 비판으로는 실험에서 조작한 풍요로운 환경은 정상적인 환경과 매우 유사하였으므로 이 연구결과와 나타난 시냅스 밀도 차이는 풍요로운 환경의 긍정적효과라기보다는 인위적으로 박탈된 환경에서 극도의 자극 결핍이 뇌발달에 부정적 영향을 준 것으로 해석하는 것이 타당하다는 지적이다. Diamond 등의 원래 연구에서는 모든 연령대의 쥐에게서 얻어진 자료이지 어린 쥐에게서만 얻어진 자료가 아니므로 아동에게 풍요로운 환경을 제공하여야 한다는 주장 역시 무리이다(Greenough et al., 1987). 사회문화적 가치에 따라 달라지는 풍요로운 환경을 어떻게 조작적으로 정의하는가도 쉽게 해결하기 어려운 문제이므로 유아의 풍요로운 환경에 대한 보다 엄밀한 연구가 요구된다.

뇌과학과 교육학 간의 연계 전망과 과제

뇌기반 학습과학은 이제 막 걸음마 단계이다. 따라서 현재까지 축적된 연구결과를 토대로 실제적인 교육개혁을 기대하기는 어렵다. 그 주된 이유는 현재의 연구는 매우 기초적인 연구로 제한적이고 단편적인 연구결과에 불과한 것일 뿐만 아니라 극복하여야 할 여러 가지 제약(예, 단원성 가정의 문제, 국제화의 한계, 시공간 해상도의 기술적 문제 및 연구방법론의 제약 등)으로 인해 교육현장에 적용가능한 보다 직접적이고 실용적인 연구가 불가능하기 때문이다(상세한 논의는 도경수, 박창

호, 김성일, 2002 참고).

그러나 현재의 뇌영상 기술의 발전 속도와 방대한 연구결과의 축적 속도로 미루어 짐작하건대, 조만간 다양한 유형의 연구가 가능해지고 그 결과 학습환경 설계와 교육정책 결정과 관련된 유용한 시사점을 찾을 것임은 명백하다(Ansari & Coch, 2006; Byrnes & Fox, 1998). 이미 인지 기능별 뇌지도화가 상당한 수준에까지 진척되었으며, 단순 기능적 상관을 넘어서 뇌 발달과정과 분산된 뇌 연결회로망을 탐색하고 있는 수준이다. 다양한 자극과 경험에 의한 뇌 변화 및 발달 과정이 좀 더 상세하게 밝혀지면 앞으로 특정 교수-학습 환경(교수/학습/평가 방식 등)이 뇌기능에 미치는 인과관계 연구로도 발전할 것으로 기대된다.

뿐만 아니라 특정 학습과제를 수행하는 동안 뇌의 변화를 살펴봄으로써 학습, 기억, 언어, 주의, 및 수학 등의 다양한 영역에서의 개인차 원인을 규명하고 학습장애를 진단하고 치료하는 과정에서 이미 많은 도움을 주고 있다(Bigler, Lajiness-O'Neill, & Howes, 1998). 만약 학습자 개인의 학습양식이나 인지과정 및 학습전략 사용에서의 개인차를 측정하고 평가할 수 있다면, 개인의 뇌/인지기능을 극대화하는 개별화된 교육/훈련/학습전략 프로그램 등의 개발과 영재의 선발과 교육프로그램의 개발에도 중요한 공헌을 할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 학습자의 정서와 동기의 중요성을 강조하고, 현재의 교과목 구분의 한계를 벗어나 동일한 뇌 영역의 활성화를 수반하는 다양한 학습내용을 통합적으로 연계하는 통합교과과정의 개발 등에도 뇌기반 학습과학은 많은 기여를 할 것으로 판단된다.

뇌과학 연구를 교육적으로 이해하기 위해서는 다음과 같은 몇 가지 사항에 주의를 기울

여야 한다. 우선 연구의 목적과 가설이 무엇 인지를 분명하게 파악하여야 한다. 연구가 기초이론의 쟁점을 해결하거나 기술적인 물음(예, 기억을 담당하는 뇌 영역은 어디인가)에 답하기 위한 것이라면 일단 교육적 함의를 이끌어 내는 것에는 신중을 기해야 한다. 다음으로 한 연구결과가 다른 연구결과와 일치하는지도 검토하여야 한다. 과학은 추측과 논박을 통한 점진적이고 합리적인 합의에 의해 발전하는 것이므로 중복되는 연구결과가 누적되었을 때에만 타당한 교육적 시사점을 도출할 수 있다. 또한 실험과제나 실험자극, 실험참가자 등이 실제 교육장면과 유사한지에 따라서 연구결과의 일반화가능성과 활용가능성이 달라지므로 실험설계와 연구방법에 대한 정밀한 검토가 요구된다.

뇌기반 학습과학은 학제간 접근방식이므로 신경과학과 교육학을 비롯하여 심리학, 인지과학, 컴퓨터과학 등의 다양한 분야의 협력연구가 필수적이다. 뇌의 기능을 비롯하여 학습, 나아가 교육 등의 현상에 대한 설명수준은 여러 수준이 가능하다. 세부적인 분자생물학적 설명에서부터, 유전자 수준, 뇌신경계 수준, 행동적 수준, 알고리즘적 수준, 사회문화적 수준 등 다양한 수준이 설명이 가능하므로 굳이 하나의 설명체계에 국한하여 현상을 이해할 필요는 없다. 상이한 설명수준이 만나는 접점을 통해서 이전에는 설명이 어려웠던 현상을 새롭게 설명할 수 있기 때문이다.

뇌과학 연구와 교육학 연구의 관계는 단순히 뇌과학 연구 결과에서 교육적 시사점을 찾아오는 일방향적 관계를 넘어서 교육학 연구가 뇌과학 연구의 방향을 결정하는 방식의 양방향적 관계로 발전하여야 한다. 학습과 관련하여 아직 해결되지 않는 다양한 문제들, 혹

은 상반된 이론과 연구결과, 보다 효율적인 교육환경 설계를 위한 다양한 물음들이 새로운 뇌연구 방법을 개발하고 뇌연구의 방향을 결정하는데 많은 공헌하게 될 것이다. 또한 방법론적인 측면에서 자극에 대한 뇌의 반응을 측정하고 분석하는 것이 교육심리학 연구 분야에서 새로운 유형의 종속변인으로 자리잡게 될 것으로 기대된다.

향후 뇌기반 학습과학 분야의 연구가 지향하여야 할 연구영역으로는 기존의 인지 및 학습 이론의 타당성을 검증하고 쟁점을 해결하는 연구를 비롯하여 각종 학습/교수/평가 방법의 구성요소가 되는 인지기능을 이해하는 연구가 필요하다. 또한 학습에서의 개인차의 내용과 원인을 규명하는 연구와 효율적인 교수행위와 관련된 특정 신경회로를 탐색하는 연구도 필수적이다. 초보자와 전문가의 심성모형 및 뇌인지 기능에서의 차이와 뇌발달 과정 및 발달에 따른 뇌기능 변화, 영재와 학습장애자의 인지적, 정서적, 동기적 특성에서의 뇌기능 차이 규명, 각종 학습 및 인지양식에 따른 뇌 활용 차이 등에 관한 연구 또한 이루어져야 할 것이다.

이러한 연구결과를 토대로 학습과정에서의 뇌인지 기능에 대한 연구결과가 축적되어 뇌의 기능에 대한 이해가 높아지게 되면, 각종 교수/학습 방법의 개발과 같은 미시적인 개혁은 물론, 학습자의 정서와 동기를 중요시하는 학습환경의 설계에서부터 학습자의 뇌발달에 맞추어 학제를 개편할 수도 있을 것이고, 유급제도의 효과성, 조기교육이 뇌발달에 미치는 영향, 학습자의 발달정도 평가방식, 교육과정의 변화와 교육내용 결정하는 데에도 뇌과학 연구결과가 활용될 수 있을 것이다. 또한 영유아교육, 평생교육, 영재교육 및 특수교육

과 관련된 각종 정책입안과 교육프로그램 구성에도 뇌과학 연구결과가 많은 공헌을 할 수 있을 것으로 기대된다. 최근에 Knudsen Heckman, Cameron, Shonkoff(2006)는 뇌신경과학, 경제학 및 사회학 분야의 연구결과를 토대로 초기 유아기의 교육환경에 대한 중요성을 강조하고 이에 대한 투자를 최우선으로 하여야 미래의 국가노동력을 강화할 수 있을 것이라는 예측을 내놓기도 하였다.

맺음말

인지신경과학의 급속한 발달에 힘입어 학습과 관련된 뇌의 작용과 구조 및 기제에 대한 이해와 관심이 높아지는 추세에 있는 것은 사실이다. 그러나 이러한 연구결과가 보다 효율적인 학습환경의 설계와 구성에 시사하는 바는 무엇인가? 현재로서는 이러한 연구결과를 교육장면에 직접 활용할 수 있는 단계에 있다기보다는 교육과 관련된 연구에 대한 새로운 방향과 아이디어를 제공해 주는 수준이라고 하겠다. 예를 들어, 수학에서 반복적인 기억은 언어중추와 관련이 있으며 다소 복잡한 계산은 시각적이고 공간적인 처리와 관련이 깊다는 사실이 시사하는 바는 무엇인가? 만약 이러한 발견이 사실이라면, 시각적이고 공간적인 형태의 정보처리를 이용한 교수방법이 효과적인 문제의 유형을 찾아내고, 이에 적합한 교수방법을 개발하여 그 효과를 검증하는 연구가 가능할 것이다. 또 다른 측면에서 뇌과학 기반 학습과학 연구의 필요성은 다양한 교수/학습 방법의 효과성을 검증하고, 학습과 교육 분야에서 쟁점이 되고 있거나 문제해결을 필요로 하는 물음에 대한 구체적인 해답을 얻기

위한 응용적인 교육신경과학적 연구가 가능하도록 하는데 있다(Geak & Cooper, 2003; Wolfe & Brandt, 1998).

Bruer(1997, 2002)는 특정 신경계의 기능에 대한 이해에서부터 교실에서의 인지적 행동으로 일반화 할 수 없으므로 교육은 신경과학에 의해 설명될 수 없다고 주장하였다. 그러나 이러한 주장은 뇌과학 연구결과에 대한 잘못된 해석이나 과잉일반화 오류에 대한 경고이자 현재 교육과 관련된 뇌과학 연구의 제한점을 지적하는 것이지 뇌연구 결과와 교육의 연계가능성에 대한 근본적인 반대라고 보기는 어렵다. 예를 들어, 결정적 시기에 대한 동물 연구결과가 영유아의 행동발달에 그대로 과잉 일반화되는 경우라던가 좌우반구의 편재성과 같은 오해가 매체를 통해 대중들에게 전달되면서 문제가 될 소지가 있다. 그러나 이러한 문제는 연구결과에 대한 신중한 해석과 교육적 문제를 해결하기 위한 뇌과학 연구방법의 발달 및 연구결과의 축적으로 해결될 수 있으리라 생각된다. 학습환경이 뇌에 영향을 주는 것임에는 틀림이 없고 앞으로의 과제는 어떻게 얼마나 영향을 주는지를 찾는 것이다.

따라서 뇌신경과학 분야의 기초 연구결과를 지나치게 확대 해석하거나 과잉 일반화하는 오류를 최소화하여야 하며, 논란의 소지가 있는 소수의 연구결과를 성급하게 현장에 오용하거나 이를 상업적으로 악용하는 경우를 경계하고 사전에 예방하여야 할 것이다(Goswami, 2004). 뇌 연구 결과를 특정 이데올로기를 지지하기 위해 편파적으로 끌어다 붙이는 식의 성급한 적용 역시 유의하여야 한다. 예를 들어, 조기교육을 주장하는 이들이 뇌발달 연구결과를 과잉해석하여 자신의 주장을 관철하는 사례와 우뇌형/좌뇌형 학습자 등의 오개념이

만연하게 되고 이를 토대로 성급하게 사이버 뇌교육을 양산하게 되는 것은 경계하여야 할 것이다. 이를 위해 교사, 교수, 학부모 및 학생을 포함한 교육과 관련된 모든 구성원들은 뇌에 대한 올바른 이해와 함께 신경과학적 연구결과를 올바르게 이해할 수 있는 기본 능력을 길러야 한다. 이를 위해 뇌에 대한 이해를 증대시키는 교과과정과 각종 교육 및 훈련프로그램의 개발이 절대적으로 필요하다. 교사의 입장에서 학습자의 뇌에서 무슨 일이 일어나는지, 특정한 학습활동 혹은 학습환경이 학습자의 뇌에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 이해가 효율적인 학습환경의 설계에는 필수적이다. 교사의 재교육과 연수는 물론 예비교사를 위한 교육과정에도 뇌와 교육에 관한 과목이 개설되는 것이 바람직 할 것이다.

아직은 걸음마 단계의 뇌기반 학습과학 분야이지만 기초 신경과학 분야의 연구결과가 누적되기만을 두 손 놓고 기다리기에 우리의 학습환경은 너무나 열악하다. 뇌신경과학 분야 연구자들의 주요관심은 뇌 자체의 기능에 대한 근본적인 이해에 있으므로 이를 응용한 교육적 프로그램의 개발과 교육과 관련된 연구주제에 대한 뇌과학적 연구는 교육학 분야의 몫이다. 따라서 교육학분야의 연구분야 중 뇌기반 학습과학이 기초분야로 자리잡아 교육과 관련된 실제적이고 유용한 연구주제를 신경과학적으로 접근할 수 있는 교육 및 연구환경의 조성이 필수적이다. 국가 차원에서의 뇌기반 학습과학 연구와 관련된 기본 정책을 수립하고 뇌기반 학습과학이라는 새로운 패러다임에 근거한 학제간 연구를 집중적으로 기획하고 지원하여야만 미래의 경쟁력있는 교육환경을 만들기 위한 개혁적이고 합리적인 정책을 하나씩 수립하고 실천해 나갈 수 있을

것이다.

참고문헌

- 김성일 (2003). 뇌기반 학습과학과 과학/수학 교육. **제 1 회 뇌기반 학습과학 심포지움 발표 논문집**, 83-101.
- 김성일 (2004). **뇌는 어떻게 기억하는가?** 뇌를 움직이는 마음, 마음을 움직이는 뇌 (성영신, 강은주, 김성일 편). pp. 162-200. 해나무.
- 도경수, 박창호, 김성일 (2002). 인지에 관한 뇌 연구의 개괄적 고찰, 평가, 및 전망. **한국심리학회지: 실험 및 인지**, 14(4), 321-343.
- 이정모, 김성일, 이수영, 김충기, 정찬섭, 강은주 (2003). 과학교육 혁신을 위한 뇌기반 학습과학 기획연구. 과학기술부 과제 최종보고서(R82-2002-000-00010-0).
- Ansari, D., & Coch, D. (2006). Bridge over troubled waters: education and cognitiveneuroscience. *Trends in Cognitive Sciences*, 10(4), 146-151.
- Ansari, D., & Karmiloff-Smith, A. (2002). Atypical trajectories of number development: aneuroconstructivist perspective. *Trends in Cognitive Sciences*, 6(12), 511-516.
- Ashby, F. G., Isen, A. M., & Turken, A. U. (1999). A Neuropsychological theory of positive affect and its influence on cognition. *Psychological Review*, 106(3), 529-550.
- Berninger, V. W., & Richards, T. L. (2002). *Brain Literacy for Educators and Psychologists*. San Diego, CA: Academic Press.
- Bigler, E. D., Lajiness-O'Neill, R., & Howes, N.

- (1998). Technology in the assessment of learning disability. *Journal of Learning disabilities*, 31(1), 67-82.
- Bruer, J. T. (1997). Education and the Brain: A Bridge Too Far. *Educational Researcher*, 26(8), 4-16.
- Bruer, J. T. (2002). Avoiding the pediatrician's error: how neuroscientists can help educators (and themselves). *Nature Neuroscience*, 5, 1031-1033.
- Brunswick, N., McCrory, E., Price, C., Frith, C., & Frith, U. (1999). Explicit and implicit processing of words and pseudowords by adult developmental dyslexics: A search for Wernicke's wortschatz. *Brain*, 122, 1901-1917.
- Bush, G., Vogt, B. A., Holmes, J., Dale, A. M., Greve, D., Jenike, M. A., & Rosen, B. (2002). Dorsal anterior cingulate cortex: A role in reward-based decision making. *Proceeding of National Academic Science*, 99(1), 523-528.
- Byrnes, J. P., & Fox, N. A. (1998). The Educational Relevance of Research in Cognitive Neuroscience. *Educational Psychology Review*, 10(3), 297-342.
- Cabeza, R., & Nyberg, L. (2000). Imaging cognition II: An empirical review of 275 PET and fMRI studies. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(1), 1-47.
- Caine, R. N., & Caine, G. (1997). *Unleashing the Power of Perceptual Change: The Potential of Brain-Based Teaching*. Alexandria, VA: Association for Supervision and Educational Development.
- Caine, R., & Caine, G. (1998). Building a bridge between neurosciences and education: Cautions and possibilities. *NASSP Bulletin*, 82(598), 1-6.
- Chageux, J. P. (1985). *Neuronal Man: the biology of mind*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Chugani, H. T. (1998). A critical period of human development: Studies of cerebral glucose utilization with PET. *Preventative Medicine*, 27, 184-188.
- Damasio, A. R. (1989). The brain binds entities and events by multiregional activation from convergence zones. *Neural Computation*, 1, 123-132.
- Davidson, R. J. (1998). Affective style and affective disorders: perspectives from affective neuroscience. *Cognition & Emotion*, 12, 307-320.
- Davidson, R. J. (2000). Cognitive neuroscience needs affective neuroscience (and vice versa). *Brain and Cognition*, 42, 89-92.
- De Renzi, E., Perani, D., Carlesimo, G. A., Silveri, M. C., & Fazio, F. (1994). Prosopagnosia can be associated with damage confined to the right hemisphere - an MRI and PET study and a review of the literature. *Neuropsychologia*, 32, 893-902.
- Dehaene, S. (1997). *The number sense*. New York: Oxford University Press.
- Dehaene, S., & Cohen, L. (1995). Towards an anatomical and functional model of number processing. *Mathematical Cognition*, 1, 83-120.
- Dehaene, S., Molko, N., Cohen, L., & Wilson, A. J. (2004). Arithmetic and the brain. *Current Opinion in Neurobiology*, 14, 218-224.
- Dehaene, S., Spelke, E., Pined, P., Stanescu, R., &

- Tsivkin, S. (1999). Sources of mathematical thinking: Behavioral and brain-imaging evidence. *Science*, 284, 970-974.
- Diamond, M., & Hopson, J. (2002). 매직트리 [Magic Trees of the Mind] (최인수 역). 서울: 한울림. (원전은 1998에 출판).
- Diamond, M. C., Greer, E. R., York, A., Lewis, D., Barton, T., & Lin, J. (1987). Rat cortical morphology following crowded-enriched living conditions. *Experimental Neurology*, 96(2), 241-247.
- Duncan, J. (2003). Intelligence tests predict brain response to demanding task events. *Nature Neuroscience*, 6(3), 207-208.
- Fernandez-Duque, D., Baird, J. A., & Posner, M. I. (2000). Executive attention and metacognitive regulation. *Consciousness and Cognition*, 9, 288-307.
- Frith, U., & Frith, C. D. (2003). Development and neurophysiology of mentalizing. *Philosophical Transactions of the Royal Society, Series B: Biological Sciences*, 358, 459-473.
- Geake, J., & Cooper, P. (2003). Cognitive Neuroscience: implications for education? *Westminster Studies in Education*, 26(1), 7-20.
- Geary, D. C. (1998). What is the Function of Mind and Brain? *Educational Psychology Review*, 10(4), 377-388.
- Goldman-Rakic, P. S. (1987). Development of cortical circuitry and cognitive function. *Child Development*, 58, 601-622.
- Goswami, U. (2004). Neuroscience and education. *British Journal of Educational Psychology*, 74, 1-14.
- Goswami, U. (2006). Neuroscience and education: from research to practice? *Nature Neuroscience Reviews*, 7, 406-413.
- Greenough, W. T., Black, J. E., & Wallace, C. S. (1987). Experience and brain development. *Child Development*, 58, 539-559.
- Gruber, O., Indefrey, P., Steinmetz, H., & Kleinschmidt, A. (2001). Dissociating neural correlates of cognitive components in mental calculation. *Cerebral Cortex*, 11, 350-359.
- Haier, R. J., & Benbow, C. P. (1995). Sex differences and lateralisation in temporal lobe glucose metabolism during mathematical reasoning. *Developmental Neuropsychology*, 11(4), 405-414.
- Haier, R. J., Siegel, B. V., Neuchterlein, K., & Hazlett, E. (1988). Cortical glucose metabolic rate correlates of abstract reasoning and attention studied with positron emission tomography. *Intelligence*, 12, 199-217.
- Haier, R. J., Jung, R. E., Yeo, R. A., Head, K., Alkire, M. T. (2004). Structural brain variation and general intelligence. *NeuroImage*, 23(1), 425-433.
- Hebb, D. O. (1949). *The Organization of Behavior*. New York: Wiley.
- Huttenlocher, P. (1979). Synaptic density in human frontal cortex: Developmental changes and the effects of aging. *Brain Research*, 16, 195-205.
- Jensen, E. (2000). Brain-based learning: A reality check. *Educational Leadership*, 57(7), 76-80.
- Jensen, E. (2000). *Brain-Based Learning*. San Diego, CA: The Brain Store Publishing.
- Kim, K. H., Relkin, N. R., Lee, K. M., & Hirsch, J. (1997). Distinct cortical areas associated

- with native and second languages. *Nature*, 388(6638), 171-174.
- Katzir, T., & Pare-Blagoev, J. (2006). Applying Cognitive Neuroscience Research to Education: The Case of Literacy, *Educational Psychologist*, 41(1), 53-74.
- Knudsen, E. I., Heckman, J. J., Cameron, J. L., & Shonkoff, J. P. (2006). Economic, neurobiological, and behavioral perspectives on building America's future workforce. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(27), 10155-10162.
- Le Clec'H, G., Dehaene, S., Cohen, L., Mehler, J., Dupoux, E., Poline, J. B., Lehericy, S., van de Moortele, P. F., & Le Bihan, D. (2000). Distinct cortical areas for names of numbers and body parts independent of language and input modality. *NeuroImage*, 12, 381-391.
- LeDoux, J. (1996). *The emotional brain*. New York: Simon & Schuster.
- Lee, K. H., Choi, Y. Y., Gray, J. R., Cho, S. H., Chae, J. H., Lee, S., & Kim, K. (2005). Neural correlates of superior intelligence: Stronger recruitment of posterior parietal cortex. *Neuroimage*, 29, 578-586.
- Lotze, M., Scheler, G., Tan, H. R., Braun, C., & Birbaumer, N. (2003). The musician's brain: functional imaging of amateurs and professionals during performance and imagery. *Neuroimage*, 20(3), 1817-1829.
- Maguire, E. A., Gadian, D. G., Johnsrude, I. S., Good, C. D., Ashburner, J., Frackowiak, R. S., & Frith, C. D. (2000). Navigation-related structural change in the hippocampus of taxi drivers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 97(8), 4398-4403.
- Mayer, R. E. (1998). Does the Brain Have a Place in Educational Psychology? *Educational Psychology Review*, 10(4), 389-396.
- Menon, V., Mackenzie, K., Rivera, S. M., & Reiss, A. L. (2002). Prefrontal cortex involvement in processing incorrect arithmetic equations: Evidence from event-related fMRI. *Human Brain Mapping*, 16, 119-130.
- Menon, V., Rivera, S. M., White, C. D., Glover, G. H., & Reiss, A. L. (2000). Dissociating prefrontal and parietal cortex activation during arithmetic processing. *NeuroImage*, 12, 357-365.
- Morris, J. S., Friston, K. J., Buchel, C., Frith, C. D., Young, A. W., Calder, A. J., & Dolan, R. J. (1998). A neuromodulatory role for the human amygdala in processing emotional facial expression. *Brain*, 121, 47-57.
- Neville, H. J., & Bavelier, D. (1998). Neural organization and plasticity of language. *Current Opinion in Neurobiology*, 8(2), 254-258.
- Nichelli, P., Grafman, J., Pietrini, P., Alway, D., Carton, J., & Miletich, R. (1994). Brain activity in chess playing. *Nature*, 369, 191.
- NIMH. (2004). *Imaging Study Shows Brain Maturing*. Retrieved, 17 June 2004, from <http://www.nimh.nih.gov/press/prbrainmaturing.cfm>.
- O'Boyle, M. W., & Gill, H. S. (1998). On the Relevance of Research Findings in Cognitive Neuroscience to Educational Practice. *Educational Psychology Review*, 10(4), 397-410.
- O'Boyle, M. W., Benbow, C. P., & Alexander, J. E. (1995). Sex differences, Hemispheric

- laterality, and associated brain activity in the intellectually gifted. *Developmental Neuropsychology*, 11(4), 415-443.
- O'Boyle, M. W., Cunnington, R., Silk, T., Vaughan, D., Jackson, G., Syngeniotis, A., & Egan, G. (2005). Mathematically gifted male adolescents activate a unique brain network during mental rotation. *Cognitive Brain Research*, 25, 583-587.
- OECD. (2002). *Understanding the Brain: Towards a New Learning Science*. Paris: OECD.
- Oschner, K. N., Bunge, S. A., Gross, J. J., & Gabrieli, J. D. E. (2002). Rethinking feelings: An fMRI study of the cognitive regulation of emotion. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14, 1215-1229.
- Pantev, C., Oostenveld, R., Engelien, A., Ross, B., Roberts, L. E., & Hoke, M. (1998). Increased auditory cortical representation in musicians. *Nature*, 392, 811-814.
- Patel, A. D., Peretz, I., Tramo, M., & Labreque, R. (1998). Processing prosodic and musical patterns: A neuropsychological investigation. *Brain and Language*, 61, 123-144.
- Pinel, P., Dehaene, S., Riviere, D., & LeBihan, D. (2001). Modulation of parietal activation by semantic distance in a number comparison task. *NeuroImage*, 14, 1013-1026.
- Posner, M. I., & Rothbart, M. K. (2005). Influencing brain networks: implication for education. *TRENDS in Cognitive Sciences*, 9(3), 99-103.
- Presenti, M., Thioux, M., Seron, X., & De Volder, A. (2000). Neuroanatomical substrates of Arabic number processing, numerical comparison, and simple addition: A PET study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12, 461-479.
- Rizzolatti, G., Fadiga, L., Gallese, V., & Fogassi, L. (1996). Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Brain Research: Cognitive Brain Research*, 3(2), 131-141.
- Roder, B., Stock O., Bien S., Neville H., & Rosler F. (2002). Speech processing activates visual cortex in congenitally blind humans. *European Journal of Neuroscience*, 16, 930-936.
- Sheline, Y. I., Sanghavi, M., Mintun, M. A., Gado, M. H. (1999). Depression duration but not age predicts hippocampal volume loss in women with recurrent depression. *Journal of Neuroscience*, 19(12), 5034-5043.
- Shunk, D. H. (1998). An Educational Psychologist's Perspective on Cognitive Neuroscience. *Educational Psychology Review*, 10(4), 411-418.
- Shaywitz, S. E. & Shaywitz, B. A. (2004). Reading disability and the brain. *Educational Leadership: What Research Says about Reading*, 61(6), 7-11.
- Shaywitz, B. A., Shaywitz, S. E., Pugh, K. R., Constable, R. T., Skudlarski, P., Fulbright, R. K., Bronen, R. A., Fletcher, J. M., Shankweiler, D. P., Katz, L., & Fore, J. C. (1995). Sex differences in the functional organization of the brain for language. *Nature*, 373, 607-609.
- Shaywitz, B. A., Shaywitz, S. E., Pugh, K. R., Mencl, W. E., Fulbright, R. K., Skudlarski, P., Constable, R. T., Marchione, K. E., Fletcher, J. M., Lyon, G. R. & Gore, J. C. (2002). Disruption of posterior brain systems for reading in children with developmental dyslexia. *Biological Psychiatry*, 52(2), 101-110.

- Shimamura, A. P. (2000). Toward a cognitive neuroscience of metacognition. *Consciousness and Cognition*, 9, 313-323.
- Simos, P. G., Fletcher, J. M., Bergman, E., Breier, J. I., Foorman, B. R., Castillo, E. M., Davis, R. N., Fitzgerald, M., & Papanicolaou, A. C. (2002). Dyslexia-specific brain activation profile becomes normal following successful remedial training. *Neurology*, 58, 1203-1213.
- Stanovich, K. E. (1998). Cognitive Neuroscience and Educational Psychology: What Season Is It? *Educational Psychology Review*, 10(4), 419-426.
- Temple, E., Deutsch, G. K., Poldrack, R. A., Miller, S. L., Tallal, P., Merzenich, M. M., & Gabriel, J. D. E. (2003). Neural deficits in children with dyslexia ameliorated by behavioral remediation: Evidences from functional MRI. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100, 2860- 2865.
- Wiesel, T. N., & Hubel, D. H. (1965). Extent of recovery from the effects of visual deprivation in kittens. *Journal of Neurophysiology*, 28, 1060-1072.
- Witrock, M. C. (1998). Comment on "The Educational Relevance of Research in Cognitive Neuroscience". *Educational Psychology Review*, 10(4), 427-430.
- Wolfe, P., & Brandt, R. (1998). What do we know from Brain research? *Educational Leadership*, 56(3), 8-13.
- Zago, L., Pesenti, M., Mellet, E., Crivello, F., Mazoyer, B., & Tzourio-Mazoyer, N. (2001). Neural correlates of simple and complex mental calculation. *NeuroImage*, 13, 314-327.

1 차원고접수: 2006. 10. 15

2 차원고접수: 2006. 11. 22

최종게재승인: 2006. 12. 20