

인식론의 신경 생물학적 고찰 및 수학 활동과 관련된 두뇌의 활성화¹⁾

김 연 미*

본고에서는 인식론의 여러 분야인 선천주의(nativism), 경험주의(empiricism), 구성주의(constructivism) 등이 신경생물학적으로 어떻게 대응되어 나타나는가를 고찰하고, 그들 주장의 장단점을 살펴본다.

두 번째로 위의 이론들을 통해 수학교육의 기본이 되는 수인지(numerical/mathematical cognitiⁿ) 분야를 소개하고 현재 연구 동향과 수학교육에의 적용을 모색한다. 이어서 fMRI 등의 뇌영상 촬영기법 등을 통해 현재까지 알려진 기초 대수적 활동과 관련된 두뇌 영역을 확정해보고자 한다.

1. 서론

인류사에 이름을 남긴 선구자들은 인간의 본성이나 지식의 본질 및 앎의 과정에 대하여 추구하고, 중요한 철학적, 사회적 고찰을 하였다. 플라톤, 아리스토텔레스, 칸트, 루소 등 교육 사상에 영향을 준 인물들을 다수 꼽을 수 있다. 그리고 현재의 수학 교육에 영향을 주는 분야로 인지 심리학이나 구성주의 철학도 꼽을 수 있을 것이다. 이들 이론들은 후대의 학자들에 의해 깊이 연구되고, 발전되고, 교육 현장에서 검증받고 있다. 그러나 선천주의, 경험주의, 또는 인지주의 등이 말해주듯 이러한 사상들은 인식의 측면에서 어느 한 면의 중요성을 강조한 것으로 그 자체로 완벽하다고는 할 수 없을 것이다. 19세기 이전의 철학자들은 대부분 순수한 이성과 사유, 그리고 개인적 통찰을 통하여 사상을 전개하였고 그들에게는 현대 과학의 놀라운 업적들은

아직 알려지지 않았다. 현대에 들어서서 몇몇 철학자 중에서 인식론은 인간이 실제로 세계를 어떻게 표상하고 모형화 하는가를 알려주는 심리학과 신경생물학의 데이터들로부터 정보를 얻어야 한다고 주장하는 이들이 나타나게 되었다 (Quine, 1960). 위에서 언급한 철학자들이 다시 태어난다면, 그리고 그들이 현대 과학의 진보로부터 영향을 받는다면 그들은 분명 새로운 통찰을 우리에게 줄 것임을 의심할 여지가 없다.

생물학은 지난 20~30년간 유전학, 신경생물학 분야에서 큰 발달을 이루었고, 이제 인간의 가장 신비로운 영역으로 남아있던 블랙박스인 ‘뇌’의 비밀을 점차로 벗겨가고 있다. 또 PEG나 fMRI와 같은 뇌 영상 기술의 발달은 뇌의 특정 영역이 다양한 활동이나 경험 혹은 환경의 자극에 의해 어떻게 활성화 되는 가를 보여주고 있다. 파스퇴르 연구소 소장인 Changeux(1995)는 뇌에서 수학이 어떻게 나타나는 지를 밝히는 것이 신경과학의 큰 목표라고 언급하였다. 추상화, 유추, 논리적 사고를 특성으로 하는 수학의 이런 측면들은 감각이나 지각을 넘어서선 고등 정신 기

* 홍익대학교, kimym@hanmail.net

1) 본 연구는 2009년도 홍익대학교 학술연구조성비에 의하여 수행되었음.

능이므로 신경 생물학 분야에서 관심을 갖는 것은 당연하다.

한편 인지 심리학자나 신경 생리학자들이 자신의 연구를 수행하고 정신과 뇌의 기능에 대한 실험적으로 올바른 이론을 향해 골격을 세워 갈 때도 여러 사상가들의 인식에 관한 선험적인 통찰은 매우 중요한 요소다. 과학자들 중에는 인식론이 자신들의 사고와 실험 방향, 그리고 결과의 해석까지도 의존할 수 있는 근간임을 숨기지 않는다(Churchland & Sejnowski, 1990). 많은 신경 생물학자들이 행동주의나 인지 심리학, 혹은 구성주의로부터 영향을 받았음을 밝히고 또 학자의 이름 앞에 ○○주의자라는 수식어가 붙어 있는 경우도 흔히 볼 수 있다.

수학 교육 분야에서는 이미 인지 심리학을 통하여 학습과 기억에 대한 이론들을 접해온 지 오래이다. 그러므로 이들에 대한 좀 더 상세한 메커니즘을 통하여 유전이나 환경이 학습에 기여하는 바를 이해하는 것은 두뇌의 기능이나 인지 과정에 대한 이해뿐만 아니라 수학 교육의 인식론 까지도 과학적으로 검증할 수 있는 또 다른 토대가 될 것이다. 본고에서 소개하는 이론들은 아직까지는 의식이라든가 동기적 측면, 또는 수학과 같은 고등 정신 활동에 대하여는 이제 겨우 걸음을 떼는 단계이고, 학습이나 기억에 대한 분자적, 신경 회로적 접근을 했다는 점에서 환원주의적이라고 할 수 있다. 이러한 지식들을 토대로 본 연구는 두 가지를 목표로 하였다.

<표 1-1> 인식론의 신경 생물학적 대응 구조 및 특징

인식론	선천주의 (플라톤, 칸트, 라이프니쯔)	경험주의 (흄, 로크)	구성주의 (Piaget)
신경생물학적 대응이론	선천주의	선택주의	신경구성주의
표상의 구성	내재적으로 결정됨	내재적 결정과 환경과의 상호작용	환경과의 상호작용
학자	Chomsky, Devlin, Dehaene 진화심리학자	Changeux, Edelman	Sejnowski, Quartz
특징	영역 특징적 기능, 독립된 모듈/고정배선	시냅스의 퇴화 활동에 의거한 안정성 (stability)	활동에 의거한 시냅스 구성

첫째는 우리에게 잘 알려진 인식론의 여러 분야 - 선천주의(nativism), 경험주의(empiricism), 구성주의(constructivism) 등이 신경 생물학 분야에서는 어떻게 대응되어 나타나는지를 살펴보고자 한다. 생물학에서 진행되었던 유전이나 환경이냐의 오래된 논쟁을 생각해보면 그러한 생물학적 대응물이 존재한다는 것이 그리 놀랍지 않을 수도 있을 것이다. 두 번째로는 이들 이론들을 통해 수학 교육과 밀접한 관련이 있는 수인지(numerical/mathematical cognition) 분야나 기타 수학적 활동과의 관련성을 살펴보고자 한다.

II. 본론

다음 표는 앞으로 살펴볼 인식론의 제 분야와 이에 대응되는 신경생물학적 이론들, 표상(representation)의 구성과 관련된 주장 및 그 학설의 대표적 학자들을 요약한 것이다.

<Churchland & Sejnowski(1990)을 참고하였음.>

1. 선천주의(nativism)

그리스 시대까지 거슬러 올라가는 고전적인 선천주의는 Plato 와 Descartes의 철학으로 지칭되며, 그들은 인간 마음속에 신이나 그와 동등한 존재, 과정 등을 통하여 도덕관념, 신, 숫자, 보편적 진리 등과 같은 본유 개념들이 존재한다고 가정해 왔다. 오늘날의 선천주의자들은 유전학이나, 인지 심리학 등에 기반을 두고, 고전적 선천주의를 계승, 발전시켜왔다. 그들은 인간이 선천적 지식 자체를 가지고 있다고 주장하지는 않지만, 특정한 종류의 환경 정보를 더 쉽게 획득할 수 있는 선천성을 진화적으로 획득했다고 주장한다(Pinker, 1994). 선천성은 인지 심리학에서도 중요 개념이다; 그렇지만 이는 또 상당한 개

념적 혼란을 야기 시킨다. 18세기 경험주의 철학자 Hume은 선천성이 잘 정의되지 않았을 뿐 아니라, 논쟁을 장황하게 이끌어, 결코 문제의 요점을 집지 못하는 수준까지 이르게 한다고 불평하였다(Hume, 1983). 먼저 선천성이란 개념을 다양한 측면에서 살펴보고, 연구의 주제인 수 감각의 선천성을 주장하는 근거나 진화 심리학적 주장을 살펴보고 그들의 시사점을 고찰해본다.

가. 선천성의 다양한 측면들

철학자, 인지 심리학자, 생물학자, 그리고 일반인들이 선천성(적)이란 단어를 사용할 때 서로 다른 의미로 사용하고 있다. 사춘기 무렵부터 발현하는 2차 성장과 같은 특징은 선천적이라고 인정되지만(생물학적인 의미로) ‘수학 영재아’의 경우처럼 재능을 부여받았다는 것과는 다른 의미로 쓰인다. Griffith(2002)나 Samuels(2004) 등은 그 의미를 명확히 하려고 시도한 여러 학자들 중 일부이다. 여기서는 Samuels의 분류를 간단히 소개한다.

- 상식적인 의미의 선천성
- 습득되지 않았다는 의미의 선천성(innateness as non-acquisition)
- 출생 시 존재한다는 의미의 선천성(innateness as presence at birth)
- 내적인 원인들의 결과물이라는 생각(innateness as the product of internal causes)
 - 생물학에서의 선천성
 - 유전적 결정이라는 의미의 선천성(innateness as genetic determinism)
 - 발달상 불변이라는 의미의 선천성(innateness as developmental invariance)
 - 높은 유전성이라는 의미의 선천성(innateness as high inheritability)
 - 인지 심리학에서의 선천성
 - 학습되지 않았다는 의미의 유전성(innateness as not learned)
 - 심리적인 원형으로서의 선천성(innateness as

psychological primitives): 인지 과정이나 심리적 과정을 거치지 않는다는 의미이다.

이와 같은 다양한 개념 해석의 이면에는 유전자의 발견과 진화 심리학의 발달도 한 몫을 한다. 처음에 유전자는 가상의 실체였지만 1944년 이후 DNA가 유전자라는 개념의 물질적 기초라는 사실이 밝혀졌다. 그리고 1953년 왓슨과 크릭이 DNA의 분자 구조를 해명함으로써 유전자 가설을 실질적인 이론으로 바꾸어 놓았다. 오늘날 우리는 DNA복제가 세포 분열 과정에서 정보가 전달되는 생화학적 기초임을 알고 있다. 유전자는 단백질이라고 하는 생화학 물질의 유전 암호를 지칭한다. 따라서 유전자가 뇌에 미치는 영향을 알고자 한다면 단백질이 뇌의 다른 화학 물질이나 뉴런과 어떻게 상호작용을 하는지를 알아야 할 것이다. 그러므로 생물학에서는 선천성을 (1)유전적인 결정 또는 유전자형(genotype)이 원인이고 그 결과로 표현형(phenotype)이 나타난다는 발상, 혹은 (2) 적절한 환경요소들의 범위 내에서는 발달에 따라 변하지 않는 특색 등으로 설명하고 있지만 이러한 설명은 유전적 결정론을 강조하고 발달 과정상의 경험이나 환경에 의한 뇌의 가소성이나 유연성은 반영하지 못하고 있다. 그런 이유로 인지 심리학 분야에서는 선천성에 대하여 독자적 설명을 모색한다. 즉 선천적 인지구조란 획득된 것이지만, 획득 과정의 인지적/심리적 과정은 설명될 수 있는 것이 아니며, 그보다 하위의 생물학적 수준에서만 '어떻게' 획득되었는지에 대한 설명이 가능할 뿐이라는 것이다(Samuels, 2004).

행동주의가 지배하던 1950년대에는 학습이란 학습하는 대상이 누구이건, 또 학습 과제가 무엇이든 간에 대동소이하게 작동하는 보편적인 능력이었다. 이러한 사고 경향에 반기를 든 사람들 중 언어학자 Chomsky(1980)가 있었다. 그는 자연 언어는 인간에게만 유일한 것이며, 언어 능력은

심장이나 다른 장기처럼 그냥 존재하는 것-즉 경험적으로 유도되는 것이 아닌 정신적 인지 기관(mental organ)으로 인간이 가진 여타의 학습 능력과는 다르다고 주장했다. 전 세계의 아동들이 시간과 장소에 관계없이 다양한 외적인 변인에 관계없이 2세 말 무렵이면 말할 수 있다는 것이 바로 그 증거라는 것이다. 이러한 인간 유전체에 부호화된 보편문법(universal grammar)이라는 개념은 몇몇 심리 능력이 선천적이라고 주장하는 인지 선천주의의 초석이 되어왔다. 이러한 주장들은 처음에는 아동을 관찰한 결과를 토대로 한 주장이었지만 선천주의는 지난 20년간의 과학의 발달에 힘입어 인간 정신 발생에 대한 일반적인 견해도 많이 바뀌어 놓았다. 연구에 의하면 신생아는 태어날 때 이미 엄마의 목소리를 기억한다고 한다. 그 외에도 신생아가 모국어와 외국어를 구별한다든가(Nazzi 등, 1988), 정상적인 얼굴과 일그러진 얼굴의 사진을 구별할 수 있다는(Johnson 등, 1991) 연구도 있다. Spelke 등(1986)에 의하면 생후 몇 개월이 지난 유아들은 그들이 볼 수 없는 사물을 기억한다는 연구도 그런 범주이다.

그리고 선천적 언어 능력이라는 가설과 함께 진화 심리학자들은 그 외의 정신 능력들- 인과 관계에 대한 이해 능력, 선과 악에 대한 개념 등도 타고난다고 주장한다. 그들은 인간의 수 본능에 대해서도 신생아의 경우 수 본능- 1, 2, 3 정도의 작은 수에 대한 지능-이 존재하며, 두 수의 차이가 클 경우의 두 수의 대소 관계를 안다고 주장한다. 신경학자인 Dehaene과 수학자 Devlin은 각각 The Number Sense(1997)와 Math Gene(2000)에서 작은 숫자는 그 의미를 우리가 애써 배워야 하는 무엇이 아니라, 노력 없이, 자연스럽게 그 감각을 습득할 수 있는 능력을 타고났다고 역설한다.

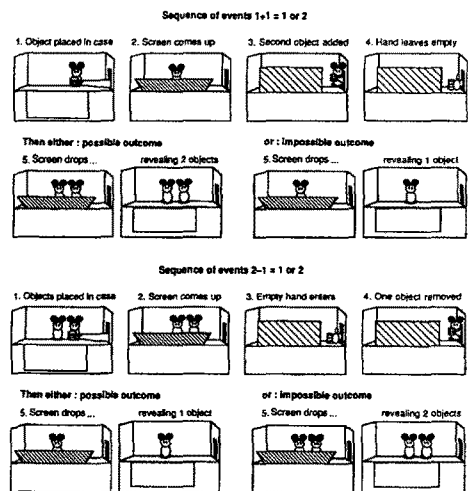
결국 인간의 마음의 기능은 뇌의 구조로부터 오는 것이므로, 그들의 주장은 우리 뇌의 미세

회로는 선천적이며, 출생 전후에 전반적으로 기능별 회로 구성이 되어있다는 것으로 종합할 수 있다. 이제 수학 교육의 관심 주제인 수 감각의 선천성에 관한 연구들을 살펴보자.

나. 수 감각(number sense)

동물 행동학자들이나 신경학자들은 영장류나 기타 동물이 수 개념을 갖고 있는지 다양한 실험을 수행하였다. 가령 침팬지에게 두 접시에 각각 다른 양의 초콜릿을 올려놓고 선택하게 하면 침팬지는 항상 많은 쪽을 선택하였다. 또 다른 실험에서는 침팬지에게 두 종류의 먹이 중에서 하나를 선택하라는 과제를 준다. 한 쟁반에 두 무더기의 초콜릿이 쌓여있다. 한 무더기에는 세 개, 다른 한 무더기에는 네 개의 초콜릿이 놓여 있다. 그리고 다른 쟁반에는 다섯 개의 초콜릿이 한 무더기로, 그리고 별개로 하나의 초콜릿이 따로 떨어져 있었다. 훈련을 받지 않은 상태에서 침팬지들은 거의 대부분 일곱 개의 초콜릿을 택했다. 침팬지는 $3+4 = 7$ 과 $5+1 = 6$ 을 어렵할 수 있었고, 6보다 7이 큰 수임을 알 수 있었다 (Devlin, 2000). Mc Comb, Packer & Pusey(1994) 등은 훈련받지 않은 자연 상태의 사자의 행동을 실험하기 위해 아프리카 정글에 스피커를 숨겨 놓았다. 이 스피커를 통해 한 마리에서 다섯 마리의 사자의 울음소리를 들려주게 장치하였다. 만일 암사자 한 마리에게 세 마리 사자의 울음소리가 녹음된 것을 들려주면 사자는 그 자리를 피한다. 그러나 암사자가 다른 무리 넷과 함께 있을 때 세 마리의 울음소리를 들으면, 암사자들은 싸울 준비를 하였다. 이 사실은 암사자들이 울음소리를 듣고 상대 무리의 수를 파악할 수 있다는 사실과, 이러한 판단이 감각 모듈과는 다른 신호를 기반으로 발생한다는 것으로 이는 수 감각이 다중 감각적(multisensory) 개념임을 시사한다.

영아들이 작은 수를 인식하는 가를 확인하는 첫 번째 실험은 1980년 펜실베이니아 대학의 Prentice Starkey Lab에서 행해졌다. 16주에서 30주의 신생아 72명을 대상으로 한 실험에서 아기들에게 점이 표시된 스크린을 보여주고 아기들이 스크린을 응시하는 시간을 측정하였다. 점이 두 개 표시된 스크린(점들이 가까이 있거나 멀리 떨어진)을 계속 보여주며 습관화(habituate)시키다가(동일한 자극이 반복적으로 주어지지만 아기들은 관심을 잃고 집중하지 않을 것이다) 갑자기 점이 세 개 표시된 스크린을 보여줄 때 아기들이 응시하는 시간이 길어진 것을 탐지한 것이다. 이 실험은 후에 메릴랜드 대학에서 생후 2, 3일의 아기들에게 비슷한 방법으로 재현 되었고, 신생아도 2와 3을 분별할 수 있음을 보여주었다. 그러나 이것만으로 아기들이 주목한 것이 실험 중의 다른 자극이 아닌 숫자의 변화라는 것을 어떻게 입증할 수 있을까? Wynn(1992)은 매우 독창적인 실험으로 4.5 개월의 신생아들의 수 개념을 확인시켜주었다(그림 II-1).



[그림 II-1] 영아들의 수 개념, Wynn(1992)에서 발췌함

처음에 무대 위에 놓인 인형이 스크린 뒤로 감춰진다. 그리고 두 번째 인형이 더해진다. 마지막으로 스크린이 내려가는데 때로는 두 개의 인형을 보여주고, 때로는 인형이 하나만 남는 경우도 있다(이 때 다른 인형 하나는 몰래 치워졌다). 아기들은 인형이 하나만 남는 비정상적인 경우($1 + 1 \neq 2$)를 정상적인 경우보다 더 오래 응시하였다.

Devlin(2000)은 여기에 진화심리학적인 설명을 덧붙인다. 그는 Chomsky의 선천적 언어능력을 지지하는 입장이다. 인간이 언어를 말할 수 있는 것과 같은 유전자가 진화적으로 획득 되었다면, 그 동일한 유전적 요인이 수학을 할 수 있게 해 주는 기초라는 것이다. 더욱이 언어의 일차적인 진화 이유는 의사소통을 보다 원활하게 촉진하려는 것이 아니고, 오히려 언어는 인류의 조상들이 자신을 둘러싼 세계를-물리적인 환경과 보다 복잡해진 사회세계라는 양 측면에서-점차 풍부하게 이해할 수 있는 능력을 획득하면서, 함께 발달한 능력이라고 주장한다. 또한 수학적 사고 능력을 낳게 한 핵심적인 발전은 오프-라인 사고(off-line thinking)라고 설명한다. 오프-라인 사고는 “만약 . . . 라면 어떻게 될까?”처럼 추상적인 방식으로 추론하는 능력이다. 산수는 그 본질이 오프-라인(손가락의 제어라는 물리적 연결이 끊어지고 정신적 연결만 남은 상태를 의미한다) 조작이라고 생각한다. 이것은 사람의 뇌가 손가락 조작과 연결된 두뇌 과정을 손가락을 제어하는 근육으로부터 분리시킬 수 있게 되었을 때 가능해졌다는 것이다(p70).

위에서 소개한 실험의 결과들은 Piaget의 인지 발달 이론을 정면으로 반박한다. Piaget(1952)에 의하면 산수는 논리(logic)의 일부이므로, 산술적 능력의 전제조건은 논리적 원리들의 이해인 것이다. 그의 주장을 원문대로 소개해본다.

“Our hypothesis is that the construction of number goes hand in hand with the development of logic, and that a pre-numerical period corresponds to a pre-logical level.... (중략)... In our view, logical and arithmetical operations therefore constitute a single system that is psychologically natural, the second resulting from a generalisation and fusion of the first.”

그러므로 Piaget에게 있어서, 수 개념은 보다 근본적인 능력들을 기초로 확립된다. 이 능력들은 (1)이행성(transitivity): A가 B보다 크고, B가 C보다 크면, A는 C보다 크다는 사실, (2)보존성(conservation property): 물체의 간격이 수에 영향을 미치지 않는다는 사실, (3) 집합의 수를 파악하기 위해서는 집합을 이루는 물체들의 기타 성질들-색, 크기, 형태-등을 무시하고 추상화할 수 있는 능력 등을 요구한다(Butterworth, 2005). Piaget에 의하면 논리, 수학적 능력은 외부 세계와 상호작용을 통해- 관찰하고, 액션을 취하고, 결과를 내면화하고, 규칙들을 추상화하면서 점진적으로 구성되는 것이다. 생후 1년간, 아동은 감각 운동기라 불리는 상태로 오감을 통해 외부 세계를 탐구하고, 동작 활동을 통하여 제어하는 것을 배우게 된다. 구성주의에서는 수란 세계에 대한 다른 추상적 표현과 마찬가지로, 감각운동 지능과 환경과의 상호작용을 통하여 구성되는 것이다. 그러므로 아동이 수가 무엇인지 깨닫기까지는 몇 년의 주의 깊은 관찰의 시간이 필요할 것이다. ‘수 보존 개념’이 5, 6세야 돼서 완성된다는 Piaget(1980)의 주장은 취학기 아동의 수학 교육과 관련하여 서구에서 큰 영향을 끼쳐왔다. Piaget에게 있어 만약 수(자연수)가 선천적(innate)이라면 자연수 개념은 필연적으로 무한의 개념으로 확장되어야 하지만 무한은 구체적인 수가 아닌 것이다. 만일 그에게 자연수가 선천적

이러면, 선천적인 것은 수가 아니라 수를 구성하는 과정(process) 인 것이다(p197). Piaget 는 이 밖에도 ‘공간의 구성’ 또는 ‘실재(reality)의 구성’ 등에서도 공간, 수, 실재를 인식하는 것과 이를 이해하는 인지구조를 동일시하는 경향을 자주 보여주며, 직관보다 훨씬 높은 수준의 인지 구조가 형성될 때만 그에 대한 개념이 형성되었다고 인정한다.

그런데 선천주의에서는 작은 수에 대한 감각과, 수의 대소 관계를 어렵할 수 있는 능력은 다른 동물에서와 마찬가지로 진화적으로 획득했으므로 이미 존재하는 것이고, 그러한 능력은 기초 산수를 학습할 수 있는 기반이 된다고 판단하기 때문에 구성주의적 교육관과는 다른 태도를 가지게 될 것이다.

Dehaene(1997)은 다음과 같이 구성주의를 비판한다.

“... (중략).. 그(Piaget)의 결론은 교육학자들에게 회의적인 태도와 기다려보자는(wait and see) 태도를 갖게 하였다. 6세 이전의 아동은 산수를 할 단계에 이르지 못하므로 수학을 그 이전에 가르치는 것은 무모하고 해롭기까지 하다는 생각인 것이다. 너무 일찍 가르칠 경우, 수 개념은 아동의 머릿속에서 왜곡될 수밖에 없으며 이해가 결여된 기계적 암기일 뿐이다. 이러한 이유

때문에 오늘날의 대부분의 유치원에서 아동들은 셈하기를 배우기전에 쌓기 놀이를 하며 시간의 대부분을 보내고 있다.”(p43-44)

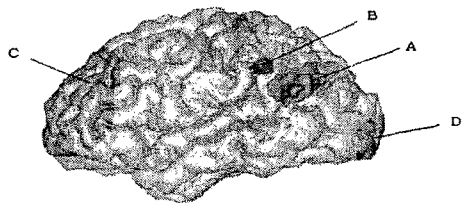
다. 수인지(number/mathematical cognition)에 관한 신경학적 접근

선천주의에서는 인간의 어떤 특정한 능력이 선천적이라는 것을 밝히기 위해 그 특정 기능과 관계된 국소적인 뇌 회로를 찾아내는데 주력하기도 한다. 언어와 관련된 뇌 영역은 주로 좌반

구 전두엽의 브로카 영역(Broca's area), 측두엽의 베르니케 영역(Wernicke's area), 시각 피질 등이 활성화된다고 알려져 있다. 이러한 연구는 19세기에 의사들이 외상, 뇌졸중, 종양 등으로 뇌의 특정 부위가 손상된 환자들의 행동을 관찰하며 시작되었다. 수 인지와 관련된 초기의 의학적 보고는 1930년 의사 Gerstmann이 보고한 증후군인데, 그는 좌 뇌의 두정엽(Parietal cortex)이 손상된 환자에서 네 가지 다른 증상이 병행되는 경우를 소개하였다. 그들은 각각 (a) 손가락 실인증(finger agnosia), (b) 좌우 구분의 어려움, (c) 쓰기 능력 결여, (d) 계산 능력 결여 등이고 이 증상들이 환자에 따라서(병변의 영역에 따라) 일부만 나타나는 경우부터 모두 나타나는 경우까지 다양하다.

선천주의 신경학자들은 수영역(number domain)이 생물학적으로 결정된(고정 배선된) 의미론적 영역(semantic domain)이라는 증거로 수 처리는 경로가 다른 신경회로들을 매개로 하며(한 곳에 집중된 것이 아닌 분산 시스템이다), 이 회로는 한국인이든 프랑스인이든 동일한 영역에서 발생한다는 것을(개인차는 분명 존재하지만) 다양한 뇌 영상 기법, 신경심리학적 접근, 자극 방법 등을 통하여 밝혀려고 한다. [그림 II-2]

[그림 II-2] 수 처리와 관련된 두뇌의 여러 영역, Dehaene(1997)을 참조



A: left angular gyrus, B: intraparietal sulcus, C: prefrontal cortex, D: occipito-temporal cortex

그들은 특히 좌, 우뇌의 두정엽 내구(intraparietal sulcus)과 좌뇌의 각이랑(angular gyrus)에 주목한다. 이 영역들을 살펴보자.

(1) 두정엽 내구(Intraparietal sulcus 이하 IPS)-수의 크기(quantity)에 대한 의미론적 시스템(semantic system)을 담당하는 영역: 동물들에게서도 존재하고 유아에게서도 발견되는 비언어적 수 감각, 혹은 크기(양)에 대한 심리적 표상 능력으로 이는 후에 인간에게서만 발달되는 보다 복잡한 기호 사용을 통한 수 처리 능력과 형식적 수학 능력의 근거라고 생각한다(Gallistel & Gelman, 1978). 이러한 비언어적(non verbal) 수 감각은 좌, 우뇌의 IPS에서 처리되며 fMRI 등에서 이 영역은 정확한 계산 보다는 수 비교(comparison), 근사적 계산(approximation), 한 자리 수 뺄셈 등에서 주로 활성화 되는 것을 보였다(Dehaene 등, 2005). 그러므로 이 영역이 손상된 환자 중에는 3과 5 사이에 오는 숫자가 무엇인지 모르거나 (비록 그들이 $3 \times 5 = 15$ 를 알고, 화요일과 목요일 사이에 수요일이 있으며, 알파벳 B와 D 사이에 C가 온다는 것을 알지만), 두 수의 크기 비교를 어려워하는 경우가 있다(Dehaene, 1997). 앞에서 언급한 Gerstman 증후군도 IPS에 손상이 왔을 때 주로 발생하는 것으로 알려진다. 이러한 사실에서 IPS영역은 양의 조작이나 의미적(semantic) 표상에 특정적으로 반응하는 영역인 것으로 보인다.

(2) 좌뇌의 각이랑(angular gyrus 이하 AG)- 수의 언어적 처리와 관계있는 영역

이 영역은 산수의 언어적 기반과 관련이 있다고 알려졌는데 양적인 처리 과정보다는 구술적으로(verbally) 저장된 단순 암기(rote memory) 과제나 단순한 수학적 사실들을 인출할 때 기여하는 것으로 알려져 있다. 그러므로 어릴 때 들은 자장가라든가 구구단 표가 구술적으로(삼삼은 구의 형식으로) 저장된 곳이다. 좌 뇌의 AG

는 언어 시스템의 일부로 추정되는데 수와 관련해서도 언어적 처리를 요구하는 과제에서 활성화 된다. 이 영역이 손상된 환자에게서는 실어증(aphasia)이 동반되는 경우가 많고 근사적인 계산을 담당하는 우뇌 영역은 온전하므로, 구구단을 연상하지는 못해도 수의 대소 비교, 분할(bisection)은 가능하다. 최근의 뇌 영상 기법의 발달은 계산 과정에 대한 해부학적인 이해를 더욱 증진시켰으며, 최근에는 왼쪽 두정엽 AG를 침범하는 신경교종(glioma)의 제거 수술에도 활용되었다. Daffau와 동료들(2002)은 왼쪽 AG에서 국소 마취수술 중(intraoperative) 환자에게 단순 곱셈, 뺄셈을 시키면서 연산에 관여하는 피질 영역을 세분화하며 대응시켜 피해를 최소화 시키는 방법으로 종양을 제거하였다.

(3) 좌, 우뇌의 후두-측두부 하부 피질(inferior occipito-temporal cortex)-수의 시각적 인식과 관련된 영역

좌 뇌와 우뇌 모두 아라비아 숫자와 수의 크기를 인식하는데 관여한다. 좌 뇌와 우뇌의 시각 시스템은 숫자 6과 여섯 개의 점(.)을 인식하고 그들이 동일한 양을 나타낸다는 것을 이해한다. 그러나 좌 뇌만이 숫자의 언어적 표현(6 뿐 아니라 여섯, six 등)과 구구단 등의 구술적 기억(삼구 이십칠 등)에 관여한다. 또 좌 뇌에서도 단어(육), 숫자(6), 점(.) 등은 세분된 상이한 경로를 통하여 처리된다. 이러한 사실들은 좌뇌와 우뇌 사이의 정보 교환을 담당하는 뇌량(corpus callosum)이 손상된 환자들을 통해서 밝혀졌다(Dehaene, 1997).

(4) 전전두피질(prefrontal cortex)-고등 인지의 사령관

전두엽은 계획세우기, 순차적 계산, 결정 내리기, 실수의 수정, 전략세우기 등의 고등 정신 활동의 사령관으로 알려져 있다. 전두엽이 손상된 환자는 100-3은 계산할 수 있지만 100에서

3을 연속적으로 빼는 계산 100-3-3-...은 수행하지 못하고 1회 계산으로 끝난다.

전두엽의 역할과 수학 활동의 분산 시스템은 수학적 오류 발생에 대하여도 신경학적 설명을 해 준다. 다음 예를 살펴보자.

· 농부에게 소가 30마리 있다. 농부는 7마리를 제외하고 모두 팔았다. 그에게는 몇 마리가 남았을까?

· 영수는 5000원을 저축했다. 이 금액은 철수가 저축한 액수보다 2000원 적다. 철수는 얼마를 저축했을까?

저학년 학생들 중에 오답을 재빠르게 답하는 경우를 종종 목격한다. 왜 어떤 학생들에게는 '적다'라든지 '제외하고'를 읽었을 때 이것이 자동적으로 뺄셈으로 연결되는 것일까? 그들은 왜 좀 더 조심스럽게 문장을 읽고 상황과 의미를 파악해서 올바른 연산을 찾지 못할까? 일반적으로 전두엽의 성숙은 다른 영역에 비하여 느려서 사춘기 이후까지도 진행된다고 한다. 이 시기 이전의 아동/학생들은 계산의 충동을 이길 만큼 다양한 함정 문제를 충분히 다루지 못했을 것이고, 또 전두엽도 다양한 전략을 익히지 못한 상황으로 해석할 수 있다.

한편 기초적인 산수 능력은 왜 독립된 영역이 아니라 분산되어 존재하는 것일까? 기초 산수 능력과 관련된 회로가 여기 저기 흩어져 있는 것에 대하여는 진화심리학적 설명을 덧붙이고 있다. 무리지어 사는 동물의 경우 적의 무리가 공격할 때 도망갈지 대적할 지를 판단하기 위해서는 적의 숫자를 파악하는 것이 필수적이다. 근사적인 숫자 감각은 동물들의 생존을 위해 오랜 진화 과정상 획득된 것이다. 그런데 수학이나 쓰기는 인류의 역사상 매우 최근의 것이므로 아직 진화적으로 어떤 독립된 영역을 차지할 만큼 오래되지 않았으므로 다른 용도로 쓰이던 기존의 영역을 침범해서 나누어 쓰는 식으로 발전할 수

밖에 없다는 논리다. 그래서 숫자의 시각적 인식은 손가락과 관련된 부위와 관계가 깊고, 구구단 암기는 언어 영역에서 기계적 암기와 관련된 부영역과 매우 근접한 회로를 형성한다는 것이다.

이상에서 살펴본 것처럼 수인지 분야는 인지 과학의 한 분야로 수와 수학적 사고의 인지적, 발달상의, 그리고 신경학적 기반을 연구하는 분야이다. 이 분야는 학제 간(interdisciplinary) 연구 분야로 인지 심리학, 발달 심리학, 신경과학, 인지 언어학 등 여러 분야의 연구자들을 포함하고 있고 수학 교육에도 상당한 영향을 끼칠 것으로 보인다. 현재 수 인지 연구 분야의 중요한 주제들은 다음과 같다.

· 인간이 아닌 동물들은 수 감각을 어떻게 처리하는가?

· 유아는 수에 대한 이해를 어떻게 획득하는가? 그리고 어느 정도까지 타고난 것인가?

· 인간은 언어적 기호(linguistic symbols)와 수/량을 어떻게 연관 짓는가?

· 대수적 정보는 마음속에서 어떻게 표상되는가? 또 대수적 과정은 어떻게 해결되는가?

· 기호는 어떻게 처리 되는가?

· 이러한 능력의 신경학적 기반은 무엇이며 어떤 기억의 구조가 연관되어 있는가?

한편 수 인지 분야에서 뜨거운 논쟁이 벌어지고 있는 주제는 뇌의 두정엽 피질에서 수를 처리할 때 과연 표면 형식(surface format)과는 독립적인 표현이 존재하는가 하는 것이다. 수는 다양한 방식으로 입력된다. 10(numeral), 십(ten), 십([sip], 음성적 기호), 열 개의 물체 또는 점, 그리고 로마 숫자 X 등의 입력 방식을 생각할 수 있다. 이 때 수가 처리되고 수의 크기를 표상하는 것으로 알려진 IPS 영역에 이러한 표면 형식이 영향을 미치는 정도를 이해하는 것은 중요한 문제이고, 이는 뇌에서 수가 존재하는 추상적 표상화의 정도를 이해하는데 도움을 줄 것이다

(Ansari, 2007). 몇몇 인지과학자들은 수 기호의 표면 형식이 수의 크기가 처리되는 방식에 결정적인 영향을 준다고 주장해 왔다(Campbell, 1994). 이와는 반대로 McClosky(1992)와 Dehaene & Cohen(1995) 등은 신경학적 기반을 토대로 수의 크기를 표상화 시키는 의미론적 처리(semantic process)는 형식의 영향을 받지 않는 단일한 표상화임을 주장해왔다 또한 Piazza 등(2007)과 Cohen Kodash 등(2007) 등에 의해 최근에 발표된 두 연구는 상반된 결과를 보여준다. Piazza 등은 기호 표기의 변화와는 관계없이 IPS 와 전두엽에서 거리효과²⁾에 의해 활성화가 일어남을 관찰하였다. 한편 Cohen Kodash 등은 실험에서 좌우뇌의 비대칭적 반응을 관찰하였다. 즉 좌뇌의 두정엽 피질은 형식에 관계없이 단일한 추상적 표상이 존재하고, 우뇌에서의 표상화는 표기 형식에 따라 달라지며, 비추상적인 표상화도 동시에 존재한다는 것이다. 두 편의 논문은 이 주제가 계속되는 진행형이며, 새로운 국면으로 접어들고 있음을 보여준다. 보다 자세한 연구는 후속으로 넘기고 이제 인식론의 두 번째 주제인 선택이론을 고찰해 본다.

2. 선택이론(selectivism, 신경 다윈주의)

뇌의 기능적 역할의 세분화와 그들의 역할이 탄생 시 대체적으로 고정 배선된다는 선천주의적 사고는 많은 반론에 부딪혔다. 예를 들면 좌뇌에 언어 영역이 존재한다고 하지만 좌뇌를 다친 유아의 경우는 우뇌에서 이런 기능의 일부를 넘겨받아 언어활동에 문제가 없는 경우도 존재한다. 또 독립적인 인지 모듈-예를 들면 얼굴 인식 모듈, 언어 모듈 등(최근 신경 마케팅 분야의 권위자 호이젤은 사냥 모듈까지도 언급하고 있지만)을 가정 한다면 몇 가지 심각한 문제에

부딪히게 된다. 뇌에 존재하는 뉴런의 수는 제한되어 있다. 인지 단위가 전부 고갈되거나 일상적으로 진행되는 뉴런의 죽음에 따라 사멸해버리면 어떤 일들이 발생할까? 그 경우 우리는 가까운 가족을 알아보지 못할까? 또 선천주의는 유전적 결정론에 반대하는 과학자들로부터 공격을 받았다. 과학자들 중에는 genome처럼 고정적인 것만으로는 뇌의 발생처럼 유연한 활동을 설명할 수 없다고 주장한다(Edelman, 1987). 선택이론은 다윈의 자연선택 이론에서 유래하였고, 1960년대 후반에 면역학 분야에서 Jerne가 항체 형성 과정에 이 이론을 도입한 뒤, 신경 생물학 분야에서 뇌기능과 학습에 적용되었다. 선택 이론의 근간이 되는 다윈의 자연 선택 이론을 살펴보자.

가. 다윈의 자연 선택이론

다윈의 자연 선택이론은 생물학적 진화에 대한 여러 설명 중 하나다. 그 외에도 획득 형질의 진화라든가 정향 진화설(합 목적론적 발달)도 적응(adaptation)의 문제를 설명하기 위한 여러 가설의 일부이다. Darden & Cain(1989)에 의한 자연 선택의 과정은 다음과 같다.

- (A) 전제조건: 다양성을 가진 개체로 이루어진 집합과 특별한 요소를 지닌 환경
- (B) 상호작용: 개체와 환경과의 상호작용. 개체들이 다양하므로 각 개체들은 다르게 상호작용 할 것이다.
- (C) 다양한 효과: 서로 다른 상호작용으로부터 여러 형태의 효과가 나타날 것이고 개체들은 이득을 얻거나 손실을 입을 수 있다(benefit or loss)
- (D) 장기간의 효과: (C)로부터 개체의 생존이나 번식에 유리한 효과가 축적되어 특정 개체(들)는 여러 세대를 걸쳐 혈통을 이어간다.

2) 두 수의 대소 비교에서, 두 수간의 차이가 클수록 판단을 내리는 반응 시간이 짧아진다는 내용

노벨상 수상자인 Jerne(1966)는 이 이론을 면역학 분야에 도입하였다. 면역학 분야에서는 이전에는 외부 항원(antigen)이 세포로 들어와 항체 분자를 만들도록 지시한다고 생각하였다. 그러나 이것이 가능하려면 세포가 외부 항원을 동정(identify)하는 능력을 갖고 있어야 한다. 그는 항체가 만들어지는 메커니즘을 생각했고 그 결과 다양한 항체로 조립될 수 있는 사전적으로 존재하는 선구 분자들의 풀(pool)에서 특정 선구분자들을 선택하는 메커니즘이 실제로 작동하는 원리를 밝혔다(p301). Jerne는 그 후에 자신의 항체 이론을 학습에 적용했다. 그는 로크의 경험론, 즉 마음은 경험에 의해 채워지는 빈 서판이라는 가설이 가지는 지시론적 의미에 반대하고, 애초에 학습이란 불가능하다고 믿었던 그리스의 소피스트들 편에 선다. 그는 경험으로부터 학습한다는 개념(지시개념)을 부정하고, 경험은 단지 이미 존재하는 잠재적 지식들을 선택할 뿐이라고 주장했다. 소크라테스의 말을 부연하여, 그는 “학습이란 뇌에 이미 들어있는 것을 회상함으로써 구성된다”라고 했다(p131-132, LeDoux, 2002).

신경학자 Changeux는 유전과 환경 사이의 타협을 모색한다. 우선 신경계의 유전적 결정론은 작은 무척추 동물에서는 거의 절대적이지만 척추동물에서는 그 영향이 절대적이지는 않다는 것이다. 두 번째로 발생 과정시의 시냅스 연결은 성인의 그 것과 비교해 불안정하며, 과도한 뉴런과 연결들이 발생초기에 생성되고 환경적 자극에 대하여 잘 기능하는 뉴런과 연결들만이 선택되고, 강화되며, 사용되지 않는 것들에서는 퇴화가 일어날 수 있다는 것이다. 갓 태어난 아기의 뇌에서 초기의 성장과 발육을 통하여 살아남는 것들은 상호간에 약 100조 개의 연결을 갖는다(성냥 머리 두께의 뇌 조직은 약 10억 개의 연결을 갖는다).

뉴런들 사이의 시냅스 연결은 상당부분 출생

후에 이루어진다. 쥐의 경우 출생 후 한 시간 동안 25만개의 시냅스 연결이 이루어진다는 보고가 있다(Changeux, 1980) 새로운 시냅스 연결이 정점에 이르는 시기는 생후 1년경이라는 연구가 있었지만 후속 연구에서 정점에 이르는 시기는 영역별로 다르고, 고등 정신 기능을 담당하는 전두엽의 경우는 사춘기 무렵이라고 한다. Changeux는 그 외에도 뇌 발생의 각 단계에서 유전적 요인과 비유전적 요인이 개입되고 상호작용한다고 믿는다. 유전자-어린 뉴런의 축삭을 정확한 목적지로 안내하는데 도움을 주는 단백질을 만든다-에 의한 프로그램 된 활동과 비유전적 물질-다양한 화학물질, 그 밖의 무작위성이 뒤섞여 상호작용한다(Le Doux, 2002). 이 과정에서 신경회로들 간의 엄청난 변이가 생겨서, 지문이나 홍채처럼 어떤 두 사람의 뇌의 작은 조직도 동일한 시냅스 연결을 갖지 못하는 것이다. 그러므로 환경은 직접적으로 뇌에게 지시하지는 않는다. 오히려 환경은 특정한 네트워크를 선택하고 그들 사이의 연결을 강화하는 것이다. 예를 들어 늑대가 개로 길들여지는 과정은 새로운 형질을 획득한 것이 아니라 늑대로서의 유전적 잠재력을 손실한 것이다(Changeux, 1980).

Eeleman(1987)에 의하면 뇌는 기능적으로 비슷한 작용을 하는 뉴런 그룹들 사이의 상호작용을 통해서 감각운동 정보를 처리하는 선택적 시스템이다. 이 때 뉴런 그룹들의 내적인 구조의 다양성(혹은 변이)이 그들에게 주어진 자극에 어떻게 반응할 것인지를 결정한다(A단계). 이제 자극 반응에 더 쉽게, 자주 반응하는 뉴런 그룹이 생기고(B 단계), 자극은 특정 뉴런 집단을 강화하거나 다른 뉴런 집단보다 자주 선택하는 효과를 가져 온다(C단계). 또 그런 잠재력이 축적된 뉴런 집단은 미래의 비슷한 자극에 대하여 보다 효과적으로 반응하는 장기적 효과를 가져 온다(D단계) (Darden & Cain, 1989)). 이를 토대로

Edelman은 뇌의 시냅스들이 마치 자연 환경 속에서 동물들이 경쟁하듯 살아남기 위해서 경쟁한다고 했다. "...(중략).. 신경회로의 패턴은 외부의 영향에 반응하여 그 지시에 의해 확립되거나 재조정되지 않는다. 그 대신 외부의 영향은 특정 시냅스들이 관련된 신경활동의 패턴을 강화시킴으로써 그 시냅스를 선택한다."

이러한 선택 이론은 수학적 문제해결과 어떠한 관계가 있는 것일까?

일찍이 Hadamard(1954)는 '수학 분야에서 발명의 심리학'에서 수학적 창조가 일어나는 과정을 준비기-배아기-영감(계시)-확인의 네 단계로 나누어 설명하였다. 그는 자신의 경험과 Poincaré의 성찰, 그 외 다른 예술가들을 인용하고 있다. 한 구절을 살펴보자.

"수학이든 다른 분야든 간에 발명이나 발견이 관념의 결합에 의해 이루어진다는 것은 명백하다. 그런데 그 결합의 수는 무척 많아서 대부분 흥미가 없는 것들이고 그 결합들 중 극소수만이 생산적인 것이다. ...(중략) 그러한 결합을 찾기 위해서는 대단히 많은 수의 결합을 구성해야 하고 그 중에서 유익한 것을 선정해야 한다. 창조라는 것은 불필요한 결합을 만들지 않는 것이며 유익한 결합만을 검토하는 데 있다. 따라서 발명이란 판별이자 선택이다.

그리고 그는 선택의 기준으로 심미감(수와 형식의 조화의 의미, 수학적 아름다움의 의미, 기하적 설득력의 의미)을 들고 있다.

그가 인용한 발레리도 비슷한 언급을 한다. "발명하기 위해서는 두 가지가 필요하다. 첫 번째는 결합을 형성하는 것이고, 두 번째는 첫 번째에서 나온 생성물들 중에서 중요한 것을 식별하고 선택하는 것이다"

Changeux(1995)는 필드 상 수상자인 Conne와의 대담 중에 신경 다원주의를 수학적 창조행위에 적용하여 설명한다. 즉 의식적이든 무의식

적이든 엄청나게 많은 수학적 대상을 끌어 모으고, 가능성을 타진하는 단계에서 -재조합된 정신적 변이가 상당부분 만들어지고 - 선택과정에 의해 그 중 한 변이가 문제에 적합하다는 것이 알려지면-계시의 형태로 해결책이 드러난다는 것이다.

이제 관심은 관념의 결합이 어떤 방식으로 일어나는지에 대한 탐구일 것이다. 수학 교육에서도 위에서 언급한 것처럼 기초적 사실들과 기본 개념들이 통합되어 고등 수학적 개념과 같은 정신적 표상으로 발달하며, 문제 해결로 이끄는가 하는 문제는 연구자들의 관심을 끌고 있는 주제다. 아직은 명확한 해답이 없지만 이 분야는 인지 심리학이나 신경과학, 그리고 철학에서도 관심 있는 주제이다. 이제 결합 문제를 살펴보자.

나. 정보의 통합 및 해석(결합문제, binding problem) : 위계적 계층구조와 뉴런 동조 개념

테이블 위의 빨간 사과를 볼 때 그 정보가 시각 영역과 후각 영역 등에서 색깔, 배경, 향기 등으로 독립적으로 처리된 후 빨간 사과라는 속성을 우리에게 통합된 이미지로 전달해 주는 메커니즘을 생각할 수 있을 것이다. 정보의 통합에 대한 고전적인 해석은 새끼 고양이 시각을 연구한 Wiesel & Hubel(1962)에서 나왔다. 그들은 시각 담당 뉴런들이 최초의 입력 단계인 망막에서 멀어질수록 점점 더 복잡해진다는 것을 발견해 이로부터 피라미드식 계층구조를 제안했다. 즉 하부 구조의 뉴런들은 입력 정보의 일부만을 담당하고(각 뉴런의 임무가 세분화 되어 어떤 뉴런은 수직선에, 어떤 뉴런은 수평선 등에 더 잘 반응하는 식으로 임무가 분업적이다) 이들의 정보를 보고 받아 다음 단계의 뉴런은 더욱 복잡한 입력을 받는다는 가정이다. 그런데 이런 계층구조는 입력의 정점에 있는 수렴지대의 세포는 '할머니 세포(grandmother cell)'의 존재처럼

복잡하고 전문적인 대상이나 개념까지 그 안에 모든 정보를 포함하는 뉴런의 존재를 가정하게 된다. 2005년 UCLA와 CalTech의 연구팀은 Bill Clinton 대통령과 같은 유명인을 표상하는(그리고 오로지 그 인물에만 반응하는) 할머니 세포의 증거를 찾았다고 발표했다.³⁾ 그렇다면 수학에도 평행선 제 5 공준 세포, 2차 방정식 근의 공식만을 담당하는 세포가 존재할까?

오늘날에는 불가능한 ‘할머니 세포’나 ‘교황 세포’ 혹은 ‘추기경 세포’를 지지하는 과학자는 거의 없다. 그러나 서로 상이한 감각 기관을 통해 입력된 정보가 병렬적으로 처리된 후 다른 네트워크들과 소통하고 어떻게 통합된 해석으로 발전하는가하는 주제는 뇌의 ‘결합 문제(binding problem)’라는 큰 영역으로 부상하였다(Roskies, 1999). 이것은 과학자들이 그 과정을 정확히 이해하지 못한다는 측면에서 뿐 아니라, 영역 간의 연결이 끊어진 환자들에게서 관찰되는 문제이므로 결합문제는 실제 발생하는 문제이기도 하다. 결합문제는 시간과 공간적인 결합뿐만 아니라 지각과 개념을 연결하는 인지 결합문제(cognitive binding), 기억의 재구성도 포함한다.

Max Frank 연구소 소장 Singer(1999)는 인간의 뇌에는 별개의 정보 수렴 장치는 존재하지 않는다고 주장한다. Singer는 ‘결합문제’에 대한 답으로 뉴런 동조 개념(binding by synchrony)을 제안한다. 이를 간단히 소개하면 각 영역에 있는 뉴런들이 동조하면, 즉 동시에 활성화된다면 이는 동일한 입력에 기인한 것으로 생각하자는 것이다. 하나의 정보는 서로 다른 영역으로 분산되어 처리되지만 시분할(time sharing)⁴⁾을 통해 다시 묶여진다는 것이다. 뇌 안의 정보처리는 특수한 신경 세포에 의해 독립적으로 처리되는 것이 아니라 신경 세포들 간의 ‘조합’에 의해 이루어진

다. 즉 감각계에 대상이 입력, 그 대상이 가진 각각의 속성이 개개의 신경 세포를 자극하게 되고, 자극된 개개의 신경세포들이 서로 앙상블을 이루면서 통합된 지각이 되는 것이다. 정보의 상이한 측면들(색, 향기, 소리, 운동 등)이 독립적으로 처리되면서 동시에 각 network 사이의 대화와 상호작용이 이루어지는 것이다(채희태, 2005) 이런 뉴런 집합체는 위에서 본 계층구조와는 다르고 훨씬 역동적이다. 이 시나리오에 따르면 뉴런의 숫자가 고갈되는 것을 염려할 필요가 없다. 새로운 대상이 입력되면 새롭게 재조합을 하므로 사실상 무한대의 조합이 가능한 것이다.

사실 뇌에서 정보 처리가 병렬적으로 일어나는 것을 의심하는 과학자는 없다. 또 기초 대수의 여러 능력들(수 인식, 구 개념, 구구단 기억, imagery 등)이 여러 영역에 분산되어 있다는 사실은 network 간의 장거리 대화가 존재함을 의미한다. 그렇다면 과연 수렴 지대는 존재하는가? 뉴욕 대학의 신경학자 LeDoux(2002)는 단호하게 그렇다고 대답한다. 인간과 영장류에는 수렴지대가 존재하여 다양한 시스템에서 오는 정보들이 통합된다. 많은 동물들이 동조 발화에 의해 동시 학습할 수 있는 다중적이고 독립된 학습 시스템을 가지고 있지만 몇몇 동물만이 피질에 수렴지대를 갖고 있다. 한 포유동물 종의 지적 복잡성은 그들의 피질에 수렴 지대가 얼마나 많은가와 밀접한 관련이 있다. 수렴지대는 사람이 원숭이 보다 많으며, 원숭이는 쥐보다 많다.

여기서 수렴지대는 장기 기억과 관계있는 해마, 작업 기억을 담당한다고 알려진 전전두피질(prefrontal cortex 이하 PFC) 등을 꼽을 수 있다. 뇌기능은 상향식 정보 통합 기능 이외에도 주의 집중을 통한 하향적 사고를 통해서도 중요한 역할을 한다. 이 중 고차원적 수학 활동과 관련하여

3) Why your brain has a 'Jennifer Aniston cell' - being human, New Scientist, 22 June 2005

4) 시간 나눠 쓰기, 한 대의 컴퓨터를 동시에 몇 대의 단말기로 사용하는 방식

여서는 전전두피질의 역할에 관심이 집중되고 있다. PFC의 뉴런들은 과제와 관련된 정보를 유지하고, 가소성을 보이며, 다른 뇌 영역으로 정보를 피드백 하며, 자기 조직화(self-organization) 장치로 작동하는 등 일종의 사령탑의 역할을 한다(Miller & Cohen, 2001). 실제로 최근의 연구들은 적분 계산과 같은 고등 수학을 풀 때 ($\int_a^b \frac{dx}{x^2+a^2}$ 등의 적분) 기초 산수 영역들(IPS, AG) 뿐 아니라 PFC영역이 활성화되는 것을 확인하였으며, PFC에서는 연산의 순차적 명령, 집행 기능의 제어, 구술적 응답(verbal response)의 억제 등의 활동을 하는 것으로 해석된다(Krueger 등, 2008). 고등 수학적 활동을 할 때 기초 산수 영역이 활성화 된다는 사실은 의아스러울 수도 있으나 복잡한 사고도 결국은 단순한 규칙들과 사실들을 논리적으로 종합하는 과정을 포함한다는 사실을 고려한다면 이해될 것이다. 또 이 영역은 $a-b+c=d$ 형태의 암산을 할 때 성인에 비하여 8-19세 사이의 연령에서 더 활성화되는 것을 보였다(Rivera 등, 2005). 실제로 나이 많은 집단은 PFC보다는 좌뇌의 IPS를 포함한 두정엽 피질(Parietal cortex)이 활성화되는 것을 보였다. 이와 같은 차이는 청소년의 경우 성인과 같은 수준의 암산 수행 능력에 도달하기 위하여 더 많은 작업 기억과 주의를 요구하기 때문으로 풀이된다. 또 위에서 언급한 창조적 활동에서 ‘불필요한 결합을 하지 않는 것’과 관련해서 이것을 작업 기억의 개인차로 설명하기도 한다(Geary, 2004). 이는 불필요한 결합을 억제하는 개인차를 의미하는데, 이 때 관련 없는 결합들이 억제되어 작업 기억으로 편입되지 않을 때 문제 해결은 효과적이 될 것이다. 그러므로 억제가 효율적이지 못한 경우에는 불필요한 정보들이 활성화되어 작업 기억의 능력이 저하된다는 의미이다. Geary는 이러한 모델을 통하여 수학적 능력이 부족한 아동들이 문제 해결에 실패하는 상황을

설명하였다.

아직까지는 PFC의 영역별 상세한 기능이나 통합되는 방식 또는 수학과 같은 고등 인지 활동이나 개념화와 관련된 완벽한 지도가 그려진 것은 아니지만 PFC는 수학 활동과 관련된 중요한 영역으로 받아들여진다.

3. 신경 구성주의(neural constructivism)

가. 신경 구성주의의 특징

신경구성주의는 S. Quartz와 T. J. Sejnowsky(1997)에 의하여(이하 Q&S로 칭함) “인지 발달의 신경적 기반: 구성주의적 선언”으로 등장하였다. 신경구성주의에 의하면 피질(cortex)에서의 인지회로망은 환경으로부터 유도된 신경활동(environmentally derived neural network)과 신경성장 메커니즘 사이의 동적인 상호작용에 의하여 이루어질 수 있다. 퇴행적 메커니즘(시냅스의 제거)을 강조하는 선택이론과는 달리 신경구성주의에서는 피질에서의 신경회로망의 점진적 증가를 강조한다. 또 환경과 신경회로망 사이의 상호작용에 의해서 유연한(flexible)학습이 일어난다고 생각한다. 선천주의가 영역특정적인 학습 모듈(언어 모듈, 얼굴인식 모듈, 혹은 산수 모듈 등)을 강조하는데 비하여 신경 구성주의는 발생 중인 피질은 전반적으로 영역 특정적 구조로부터 자유롭다는 신경생물학적 증거들 -즉 발생 초기에 A영역에 있는 피질을 한 조각 떼어내 B영역에 이식하면 그 조각은 당초의 예정된 특징이 아니라 이식된 B 영역의 성질을 갖게 된다. 이는 세포의 최종적 기능은 국소 환경 속에서의 화학인자들²⁸ 부터 영향을 받음을 암시한다(Schlaggar & O’Leary 1991)-에 기반을 둔다. 그 대신 피질의 표현성은 당면한 문제 영역의 속성으로부터 구조를 추출하여 신경회로망이 건설된다는 일반성을 강조한다. 신경 구성주의의 중요

한 두 가지 원리는 다음과 같다.

(1) 발달이란 신경 회로의 복잡성이 증가하는 것이다.

(2) 이러한 증가는 발달을 안내하는 구조화된 환경과의 상호작용에 의존한다.

명칭이 암시하듯 그들은 주체와 환경 사이의 적극적인 상호작용이 존재한다는 Piaget의 이론과 사상을 지지한다. 또 그들은 이러한 상호작용의 구성적 속성을 강조하며 신경회로망의 구조가 Changeux의 주장처럼 퇴행하기만 하는 것이 아니라 실제로 발생 과정 중 점진적으로 더해진다는 것을 주장한다. 또 피질의 발달이 생애 첫 2년에 집중적으로 제한된다는 일반적인 생각과는 달리 피질의 발달은 훨씬 더 오랜 기간을 두고 점진적으로 일어난다는 생각이다. 이 사실은 구성적인 학습을 통해 뇌의 구조와 기능을 극대화하기위하여 피질이 진화해왔음을 암시한다는 생각이다. 신경 구성주의에서는 뇌의 전반적인 구조가 원칙적으로 유전자들에 의해 이루어진다는 사실을 최소한도 내에서 인정한다. 또 시냅스 선택이라는 퇴행이 일어난다는 사실도 받아들인다. 그러나 후성적인 선택성, 후 선택만으로는 인간의 인지능력을 모두 설명할 수 없다는 것이다. 그러므로 구성주의에서는 신경회로들은 유전적으로 프로그램 된 것이 아니라 환경에 의해 유발되는 신경활동으로부터 그 기능을 획득한다고 결론 내린다 (이상 Q&S, 1997에서 발췌, 요약함).

LeDoux(2002)는 구성주의적 주장에 대하여 활동에 의해 형성되는 연결은 완전히 새로운 연결을 창조하는 것이 아니라 본래적으로 예정된 이전의 연결에 더해지는 것이란 견해를 보여준다. 즉, 추가된 연결은 새로운 가지라기보다는 이미 있던 가지에서 내민 새 눈에 더 가깝다는 것이다.

Q&S의 논문이 발표된 후 인지심리학계에서

는 뜨거운 토론이 잇달았고 여러 학자들의 지적에 대하여 Q&S가 응답한 내용이 후속 출판되었다. 먼저 인지심리학계의 지적들은 다음과 같다(Demetriou 등, 2000).

(1) 신경구성주의가 주류 인지구성주의에 통합되기 위해서 필요한 단계들:

일반적으로 인지 발달은 다음의 요소들, 즉 표상들의 비교, 공통 요소의 추상화, 그리고 이러한 요소들을 새로운 표상으로 재편하기 등을 요구한다. 이 같은 인지의 위계적 발달 단계들을 Q&S의 구성주의 학습에서 어떻게 설명하는가? 또 신경구성주의에서는 영역 특정한 사고들: 카테고리, 양적, 공간적, 인과적 그리고 명제적 사고들이 환경과의 상호작용으로 세분화되는 신경학적 메커니즘이 초기 단계에서 어떻게 나뉘는지를 밝히기를 요구했다.

(2) 신생아에게서 나타나는 세분화되고 정교한 지각, 인지 능력들은 선천주의를 뒷받침한다. 이러한 초기의 결정 요인들을 신경 구성주의는 어떻게 받아들이는지에 대한 설명을 요구했다. 또 구성주의에서 일관성을 유지하기 위하여 몇몇 능력들의 고정적 배선 사실을 부정하는 것이 아닌가라는 비판이 있으며, 피질을 만능 인지학습 장치라고 주장하는 바람에 학습에 관여하는 시스템들이 독립적이고 다수일 가능성을 가볍게 여기고 있지 않은가라는 비판도 제기 되었다.

(3) Piaget식 발달 단계 전이를 신경구성주의에서는 어떻게 설명할 수 있는가?

(4) 발달에 영향을 끼치는 유전적 요인과 환경의 상호작용, 개인차 등이 어떻게 설명되는가? 등이다.

이에 대하여 Q&S는 발달 신경생물학(developmental neurobiology)에서 축적된 지식들로 인해 학습과 생물학적 성숙을 분리하던 전통적인 구분은 점차로 사라지고 있으며, 인지 발달의 근간이 되는 신경 발달을 이해함으로써 발달 심리학

과 발달 신경 생물학이 통합을 이루는 원리가 될 것으로 전망하였다. 또 위에서 나타난 영역 특정적 사고나 사고 영역들에 대하여도 선천성 시각 장애인과 기타 성인의 뇌에서 훈련에 의한 가소성(plasticity)이 나타남을 예를 들었다. 선천성 시각 장애인의 경우 원래는 시각을 담당해야 할 피질이 Braille 점자를 익히는 과정에서 촉각을 처리하는 일을 담당하게 된 사례(Sadato 등, 1998)을 소개하였다. 또 성인의 뇌도 발달한다는 증거를 보였는데, 운동이 해마에서 새로 생성된 세포들의 수명을 향상시킨다는 발견이 그것이다(van Praag et al. 1999). 이러한 증거들은 신경 활동이 새로운 연결을 지시한다는 개념으로 선택 이론에서의 제거라는 개념과는 반대되는 것이다. 물론 Q&S는 신경 생물학이 발달 심리학의 이러한 질문에 답하기 위해서는 좀 더 많은 증거들과 실험이 선행되고 축적되어야 할 것으로 보였다. LeDoux의 지적처럼 선택과 구성은 뇌 발생에 대한 두 가지 배타적인 이론이 아니라 회로 형성에 관여하는 상호보완적인 도구로 생각하는 것이 옳다. 그렇지만 구성주의적 사고는 뇌가소성과 관련된 많은 실험 자료들을 잘 설명하고 있으며 뇌가소성을 응용한 치료의 사례들은 특화된 학습 능력을 믿는 사람들과 보편적인 학습 능력을 믿는 사람들 사이의 논쟁의 한 복판에 있다. 이제 뇌가소성을 살펴보자.

나. 뇌의 경쟁적 가소성(neuronal plasticity, 정글의 법칙)-use it or lose it

여기서는 뇌가소성 개념을 통해 선택이론과 구성주의를 모두 가능케 본다. 뇌에 가소성-경험에 의해서 뇌의 구조가 바뀔 수 있다는 생각은 1890년 Wiliam James에 처음 언급되었다. “유기체, 특히 신경세포조직은 매우 뛰어난 가소성을 가진 것으로 보인다”(Begley, 2007). 그러나

그의 언급은 신경계는 고정되고 불변이라고 굳게 믿는 당시의 학계에서는 큰 영향을 발휘하지 못하였다. 1949년 캐나다의 심리학자 Hebb이 최초로 정리한 신경망 학습규칙에는 “함께 점화되는 뉴런들은 함께 배선되고, 동시성을 벗어난 뉴런들은 연결되지 않는다”라는 것이 있다. 그의 개념의 핵심은 ‘발화배선 이론(fire-wire theory)’으로 학습과 기억의 본질을 설명하기 위해 제안되었다. Hebb의 이론은 뉴런의 구조가 경험에 의해 바뀔 수 있다는 것이다. 뇌지도 안의 뉴런들이 동시에 자극을 받으면 서로 간에 강한 연결망이 발달한다. 또 신경 회로가 변할 수 있다면 학습문제, 심리문제 등 정보 처리에 문제가 있는 사람들에게 치료 가능성이 있는 것이다.

그 후 1960년 이후 MIT의 Altman(1963), Nottebohm(1981)등은 새들을 연구하면서 그들이 일생 동안 고정된 노래만 부르는 것이 아니라 점진적으로 새로운 곡을 만든다는 사실을 연구하였다. 동물들에게서 관찰된 가소성은 인간의 뇌에서도 동일할 것이라는 생각을 낳게 되었고, 연구자들은 인간의 뇌가 스스로를 재배선할 수 있으며, 기존의 믿음과는 달리 성인의 경우에도 새로운 뇌세포가 생성될 수 있다는 사실까지도 밝히게 되었다. 특히 Gould 등(1999)과 Eriksson 등(1998)은 새로운 뉴런이 계속 태어나고 있으며, 이는 병상에서 죽음을 맞이하는 환자에게서도 일어난다(사후 부검을 통하여)고 밝힌다. 현재 뇌 가소성은 Merzenich(2001) 등에 의해 난독증 어린이 치료를 위한 프로그램의 개발과 같은 분야에 활용되고 있다⁵⁾.

한편 경쟁적 가소성은 뇌의 처리 능력을 배분하는 과정에서 희소한 자원을 둘러싼 경쟁과, 사용하지 않으면 잃는다는 원칙에 따라 시냅스 연결이 좌우된다는 생각이다. 인간 뇌에서의 이러

5) positscience.com을 참조하시오

한 정글의 법칙은 선천성 백내장 치료를 받은 치료과정을 통해 처음 연구, 발표되었다. 수술을 받은 아기들은 생후 7개월 미만으로, 6개월 이전에 시력 상실이 시작되었다. 이 민감한 시기에 백내장을 앓은 아기는 수술이 성공적이어도 필요한 뉴런 결합을 뇌에서 형성하지 못했기 때문에 그 후에도 오랫동안 시각 장애를 겪게 된다. 그런데 한쪽 눈만 백내장 치료를 받은 아이와 두 눈을 모두 치료 받은 아이들 간의 예후를 예측하기 힘들었다. 그러나 양 쪽 눈을 모두 치료 받은 아이들이 한 쪽만 치료받은 아이들 보다 훨씬 더 시력이 개선되었다는 사실은 무척 놀라운 결과였다. 한 눈에만 백내장이 있는 경우 뇌의 시각 피질은 그 눈을 담당하는 뉴런 결합을 발달시키지 못한다. 그렇지만 정글의 법칙에 의해 다른 쪽 눈에 필요한 뉴런 연결이 그 영역을 차지한다. 한편 두 눈 모두 백내장을 앓은 경우는 피질의 시각 영역을 채워 넣을 것이 아예 없어서 피질은 좀 더 오래 동안 적응능력, 즉 가소성을 유지한다는 것이다(Greenfield, 2000). 성인이 외국어를 배울 때 겪는 어려움을 생각해 보자. 일반적인 생각은 언어 학습을 위한 임계기가 끝나 버려서 뇌가 스스로의 구조를 큰 규모로 변화시키기에는 너무 굳었다고 믿는다. 하지만 경쟁적인 가소성은, 우리가 나이를 먹어가며 모국어를 더 많이 사용할수록, 모국어는 뇌의 피질에서 언어 공간 영역을 더 많이 차지한다. 그러므로 새로운 언어를 배워서 모국어의 독재를 종식시키기가 어렵다는 것이다(Doidge, 2007).

동일한 맥락에서 수학에서 학생들이 갖는 오개념의 원인을 경쟁적 가소성을 통해 해석할 수 있다. 예를 들면 함수의 평행이동과 관련된 오개념 중 하나로 다음 예를 생각할 수 있다. 함수 $f(x)$ 의 그래프의 평행 이동에서 오른쪽으로 k 만큼 이동한 그래프의 식을 $f(x+k)$ 로 생각하는 중학생이 많은데 이는 수직선에서 오른쪽

있는 수가 크다는 ($x < x+k$) 학생들의 뿌리 깊은 믿음에서 비롯된 것이다. 또 오랜 교육과정을 통하여 공식이나 규칙을 통해 함수를 다루어 온 학생들은 고등학교에서 집합간의 대응의 개념으로 함수를 정의해도 잠재의식 속의 함수는 여전히 공식이나 규칙들이었다.

한편 Merzenich & Jenkins 등(1999)에 의하면 뉴런들도 두 단계를 거쳐 더 효율적이 된다. 연습이나 훈련을 통하여 해당 부위의 시냅스 연결이 더욱 공고해 지는 것이다. 예를 들면 택시 운전사들은 공간 기억과 관련된 해마가 일반인들에 비해 활성화 돼있고, 바이올린 연주자라면 왼손가락 운동과 관련된 대뇌 피질 영역이 넓게 분포한다. 또 뉴런들이 훈련되고 효율적이 되면서 처리 속도가 더욱 빨라진다. 그렇다면 수학적 훈련을 통해서 뇌의 관련된 영역이 어떻게 바뀔 것인가?

다. 대수적 훈련에서 나타나는 가소성

Qin (2004)등은 평균 13.1세의 학생들이 대수 방정식(예를 들면 $7x+1=29$)을 푸는 것을 배울 때 뇌 영역이 활성화되는 것을 fMRI로 찍은 영상들에 의해 몇 가지 흥미로운 사실들을 관찰할 수 있었다. 또 그들은 과거에 대학생들을 대상으로 비슷한 실험을 한 것과 그 결과를 비교해 보았다.

(1) 대학생들의 경우 뇌의 인지 영역 세 부분이 활성화 되는 것을 관찰하였는데, 첫 번째 영역은 주어진 방정식과 계산을 수행하면서 바뀌는 식의 표상을 나타내는 imaginal module(왼쪽 두정엽 피질), 두 번째 영역은 방정식을 풀기 위해 필요한 대수적 규칙과 산술 지식을 생각해내는 retrieval module(왼쪽 전두엽 피질), 그리고 결과를 손 운동으로 바꾸어 쓰게 하는 manual module(오른 손운동을 제어하는 왼쪽 운동 감각 피질) 등이 결부되어 있었다.

(2) 대학생들과 비교했을 때 청소년기의 학생들도 비슷한 영역이 활성화 되는 것을 관찰하였다.

(3) 훈련의 효과로 활성화 되는 영역이 감소하였는데 대학생들은 왼쪽 전두엽만 연습 후 활성화 되는 영역이 감소했지만 청소년들의 경우는 왼쪽 전두엽과 왼쪽 두정엽 모두 연습 후 활성화 되는 영역이 감소하였다.

위의 결과 중 (3)은 Jenkins의 설명에서처럼 훈련이나 연습의 효과로 뉴런의 효율성이 증대되고 따라서 상대적으로 적은 수의 뉴런만으로도 작업을 처리할 수 있게 되었음을 의미한다. 또 기억을 상기하는 과정을 여러 경쟁하는 기억의 자취(trace)들 중에서 옳은 것을 선택하는 과정으로 해석한다면, 훈련에 의해 기억의 자취가 강화되면서, 답을 얻는 과정이 점차 단축된다는-속도가 빨라진다는 설명이다.

이와 같이 뇌 가소성은 일반적인 발달, 적응뿐만 아니라 수학 학습과 관련하여서도 의미 있는 연구 결과들을 보여주고 있다.

4. 수학 교육에의 적용 가능성의 모색

위에서 살펴본 수 처리 및 기초 대수 활동과 관련된 두뇌 영역을 국소적으로 대응시키는 작업은 수학 학습 지진아들의 교육과 관련하여 많은 가능성을 시사한다. 현재로서는 외국의 특수교육분야에서도 일반적인 학습 장애의 가능성이 있는 아동을 판별하는 평가지로 WISC나 IQ 테스트를 사용하고 있다. 그러나 수학학습 장애의 진단과 관련된 표준화된 검사지는 아직 존재하지 못한 상황이다.

간단한 대수적 활동조차도 수의 인식, 이해, 생산(production), 대수적 사실들의 부호화(encoding) 및 인출, 전략, 기억(장기기억, 작업 기억) 등의 활동을 포함한다. 그러므로 수인지 분야의

연구는 이러한 두뇌의 대수적 활동을 세분화하고 단계화하여 문제가 발생하는 단계를 확인해주는 진단 및 검사지를 만드는데 도움이 될 것이다. 또한 수학 학습을 관장하는 두뇌 영역의 세분화에 대한 연구는 수학 학습에 어려움을 겪는 학생의 상태를 정확히 진단하여, 이에 맞는 맞춤형 교육을 가능케 할 것이다.

두뇌 가소성에 관한 연구들은 훈련이나 연습을 통하여 수학적 정보의 처리 속도가 빨라지고 대수적 사실들의 인출이 자동화될 수 있음을 의미한다. 이는 결과적으로 질차적 지식의 활성화를 통해 개념적 지식이 형성될 수 있음을 의미하는 것이다. 이와 같이 인지 신경학적 연구들은 수학교육 및 학습능력 향상에 점차 많은 기여를 하고 있으며 후속 연구를 통하여 수학교육에 적용 가능한 심도 있는 결과를 기대해 본다.

III. 결론

우리는 이상에서 선천주의, 선택주의 그리고 구성주의의 신경학적 대응물을 살펴보았다. 선천주의와 신경 구성주의의 차이를 단순화하면 출생 시의 초기 상태를 S_0 라 할 때 선천주의에서는 S_0 에 가능한 많은 능력을 가정하고 있는 것이며, 신경 구성주의에서는 그 역할을 최소화하는 것으로도 생각할 수 있다. 결국 인간이 어떠한 능력을 갖는 것에 대하여 선천주의에서는 작은 단계들이 누적되어 진화적으로 그 능력을 획득했다는 설명이고, 신경 구성주의는 출생 시 최소의 역량을 가정하지만, 인간 뇌의 자기 조직화 능력, 실수의 수정, 경험에 기초한 신경회로 구성 등을 통하여 그러한 능력이 점차로 획득된다는 주장이다. 또 선천주의에서는 진화적으로 획득한 다양한 능력들을 구성주의에서 주장하는 일반적인 인지 능력의 발현이라기보다는 영역

특정성(domain specificity)을 가정하고, 각각 다른 진화적 압력에 의해 획득됐다고 가정한다. 그러므로 언어능력, 수 감각 등은 상이한 뇌의 영역에서 처리되는 독립적인 인지 단위(module)인 것이다.

한편 신경구성주의와 선택주의의 입장은 자아가 구성되는 방식에 대하여 신경활동의 역할에 대한 초점을 어떻게 맞추는가에 대한 의견 차이로 볼 수 있다. 자아는 미리 존재하는 시냅스 연결들의 집합으로부터 ‘조각’되는 것인가(선택주의), 아니면 성장기를 거치면서 겪게 되는 경험들이 자아의 시냅스 기반에 지시를 내리고 ‘소조’해 가는 것인가? 의 문제이다(LeDoux, 2002) 그러므로 이는 유전자대 환경의 논쟁이라기보다는 경험의 진정한 기여 방식에 대한 논쟁으로 봐야할 것이다. 또 Piaget의 구성주의와 신경 구성주의를 비교하면 또 다른 차이점을 살펴볼 수 있다. Piaget는 선천주의와 경험주의를 모두 반대하고 변증법적으로 인간 주체의 자기 조절(self regulation)과 반성(reflection)등을 인지 발달의 메커니즘으로 생각했지만 신경 구성주의는 앞에선 살펴본 표에서와 마찬가지로 구조화된 경험에 근거한 시냅스의 변화와 복잡성의 증가를 가정한다. 즉 신경 구성주의에서는 경험의 역할이 상대적으로 크다고 볼 수 있다.

수학적 활동과 관련해서 선천주의, 선택주의, 신경구성주의는 의미 있는 기여를 하고 있다. 선천주의 신경 생물학자, 발달 심리학자 및 수학자들은 동물과 유아, 그리고 수 장애를 겪는 환자들, 그리고 일반인을 대상으로 한 연구들을 통하여 수 인지 및 기초 대수 활동과 관련한 뇌의 여러 영역을 탐구하여 이들의 국소적 기능 지도를 더욱 상세하게 그려가고 있다. 그들은 수학과 관련된 뇌의 시스템이 좌, 우뇌에 분포되어있음을 알아냈고 이러한 병렬 시스템이 통합되는 방식에도 주목하고 있다. 또 현재의 뇌 영상기술의

발달은 고등 수학적 활동과 같은 고차적 사고를 수행하는 전전두피질의 집행기능 이해에도 도움을 줄 것이다.

신경 다원주의로도 불리는 선택이론은 정글의 법칙을 통해 시냅스의 쇠퇴라는 현상을 설명한다. 이는 수학능력도 결국은 반복 훈련과 밀접한 관련이 있다는 항간의 믿음을 뒷받침 해 준다. 또 선택이론은 수학적 문제 해결 및 창조 활동에 대해서도 수학자들의 통찰과 근본적으로 동일한 설명을 하고 있다. 마지막으로 학습과 관련하여 가장 적극적인 태도를 보이는 인식론은 신경 구성주의인 것 같다. 신경 구성주의는 선천주의나 선택주의처럼 결정론적이지 않으며, 뇌의 구조 변화/가소성에 가장 유연(flexibility)한 태도를 견지하고 있다. 그들은 뇌의 기능이 영역 특적이거나 고정적인 것이 아니라 경험이나 학습에 의하여 바뀌고 적응하도록 진화되었다고 믿는다. 뇌 기능의 영역 특정적 세분화를 믿는 선천주의에서도 뇌 가소성을 받아들이고 있음을 주지해야 할 것이다. 이상에서 살펴본 바와 같이 고전적인 인식론들은 신경 생물학, 인지 신경 심리학 등의 눈부신 발전과 더불어 새로운 형태의 신경 인식론으로 진화했으며, 신경 과학은 과거 철학자들이 던진 화두에 대하여 검증하고, 과학적인 해석을 시도함을 알 수 있다. 또 위에서 살펴본 증거들은 우리가 결코 이들 중에서 취사선택할 필요가 없으며 각 이론은 결국 인간에 대한 이해를 풍부히 해 주는데 기여하고 있음을 알 수 있다. 수학 활동과 관련하여 새롭게 떠오르는 수 인지 분야나 뇌의 가소성과 관련된 분야는 수학 교육과 관련된 모든 이들에게 흥미롭고 도전적인 과제를 줄 것으로 믿어진다.

참고문헌

- 채희태(2005). Wolf Singer의 뇌 이론 탐색과 뇌 기능 중심 (특수) 교육의 가능성 모색. *특수교육저널: 이론과 실천*. 6(1), 425-444.
- Altman, J. (1963). Autoradiographic investigation of cell proliferation in the brains of rats and cats. *Anat Rec*, 145, 573 - 591.
- Ansari, D. (2007). Does the parietal cortex distinguish between "10," "ten," and ten dots? *Neuron* 53, 165-167.
- Begley, S. (2007). *Train your mind, change your brain*, NY: Ballantine.
- Butterworth, B. (2005). The development of arithmetical abilities, *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 46(1), 3-18.
- Campbell, J. I. (1994). Architectures for numerical cognition *Cognition*, 53, 1-44.
- Changeux, J. P., & Conne, A. (1995). 물질, 정신, 수학. (강주헌, 역), 서울: 경문사. (원서출판 1998)
- Changeux, J. P. (1980). Properties of the neuronal network, In Piattelli-Palmarini (Eds.), *Language and learning: The debate between J. Piaget and N. Chomsky*, Cambridge : Harvard University Press, 184-202.
- Chomski, N (1980). The initial state and the steady states, In Piattelli-Palmarini, (Eds.), *Language and learning: The debate between J. Piaget and N. Chomsky*, Cambridge : Harvard University Press, 107-130.
- Churchland, P. S., & Sejnowski, T. J. (1990). Neural representation and neural computation, *Philosophical Perspectives: Action theory and Philosophy of mind*, 53, 342-382.
- Cohen Kadosh, R., Cohen kadosh, K., Kaas, A., Henik, A., & Goebel, R. (2007). Notation-dependent and independent representations of numbers in the parietal lobes, *Neuron*, 53, 307-314.
- Darden, L. and Cain, J. A. (1989). Selection type theories, *Philosophy of sciences* 56, 106-129.
- Daffau, H., Denvil, D., Lopes, M., gasparini, F., Cohen, L., Capelle, L., & van Effenterre, R. (2002). Intraoperative mapping of cortical areas involved in multiplication and subtraction: an electro stimulation study in a patient with a left parietal glioma, *Journal of neural Neurosurg Psychiatry*, 73, 733-738.
- Dehaene, S &Cohen, L. (1995). Towards an anatomical and functional model of number processing. *J. of Exp. Psychology. Learning, Memory, Cognition*, 21, 314-326.
- Dehaene, S. (1997). *The number sense*. New York: Oxford University press.
- Dehaene, S., & Spelke (2005). Three parietal circuits for number processing, *Cognitive Neuropsychology*, 20, 487-506.
- Demetriou, A., Emias, P, Molenaar, P., van der Maas, H. L. J., Premack, D.,Premack, A.,S. & Sejnowski, T. (2000). Continuing Commentary, *Behavioral and Brain Sciences*. 23, 781-792.
- Devlin, K. (2002). 수학 유전자. (전대호, 역), 서울: 까치글방, (원서출판 2000).
- Doidge, N. (2007). *The Brain that changes itself*. New York: Viking Press.
- Edelman, G. (1987). *Neural Darwinism*. New York: Basic Books.

- Eriksson P.S, Perfilieva E, Bjork-Eriksson T, Alborn A. M, Nordborg C, Peterson D. A, & Gage F. H. (1998). Neurogenesis in the adult human hippocampus. *Nat. Med*, 4, 11, 1313-1317.
- Gallistel, C. R. & Gelmann, R. (1978). *The child's understanding of number*. Cambridge: Harvard university press.
- Geary, D. (2004). Mathematics and learning disabilities, *Journal of learning disabilities*, 37(1), 4 -15.
- Gould, E., Beylin, A., Tanapat, P., Reeves, A., and T. J. Shors, T. J. (1999). Learning enhances adult neurogenesis in the hippocampal formation. *Nat. Neurosci.* 2, 260 - 265.
- Greenfield, S (2000). *Brain Story*, London: BBC Books.
- Griffiths, P. (2002). *What Is Innateness?* *Monist*, 85(1), 70-85.
- Hadamard, J. (1954). *The Psychology of Invention in the Mathematical Field*, Dover, (Princeton : Princeton University Press, 1945) .
- Hubel, D. H. & Wiesel, T. N. (1962). Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in cat's visual cortex, *Journal of Physiology*. 160, 106-154.
- Hume, D. (1983). *A Treatise of Human Nature*, Oxford University Press: London.
- Jerne, N. K. (1966). The natural selection theory of antibody formation - Ten years later. In Cairns, J., Stent, G. S., & Watson, J. D. (Eds), *Phase and the Origins of Molecular Biology*, New York: Cold Spring Harbor Laboratory Press (1992). 301-312.
- Johnson, M. H. and Morton, J. (1991). *Biology and cognitive development. The case of face recognition.*, Blackwell, Oxford (UK) and Cambridge (USA).
- Kreuger, F., Spampinato, M. V., Pardini, M., Pajevic, S., Wood, J., Weiss, G., Landgraf, S., & Grafman, J. (2008). Integral calculus problem solving: An fMRI investigation, *Neuroreport*, 19(11), 1095-1099.
- LeDoux, J. (2002). 시냅스와 자아. (강봉균, 역), 서울: 도서출판 소스, (원서출판 2000).
- Gould E, Reeves A, Graziano M, & Gross C. (1999). Neurogenesis in the neocortex of adult primates. *Science*, 286(5439), 548 - 552.
- McClosky, M. (1992). Cognitive mechanism in numerical processing: Evidence from acquired dyscalculia. *Cognition*, 44, 107-157.
- Mc Comb, K., Packer, C., & Pusey, A. (1994). Roaring and numerical assessment in contests between groups of female lions, *Panthera leo*, *Animal Behavior* 47, 379-387.
- Merzenich, M. M. (2001). Cortical plasticity contributing to the child development. In Mc Clelland, J. L. & Siegler, R. S. (2003). (Eds.), *Mechanism of cognitive development: Behavioral and neural perspectives*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Merzenich, M. M., Tallal, P., Peterson, B., Miller, S., and Jenkins, W. M. (1999). Some neurological principles relevant to the origins of - and the cortical plasticity-based remediation of - developmental language impairments. In Grafman, J. and Christen, Y. (Eds.), *Neuronal Plasticity; Building a bridge from the laboratory to the clinic*. Berlin: Springer - Verlag.
- Miller, E & Cohen, J. (2001). An integrative

- theory of prefrontal cortex function, *Annu. Rev. Neuropsychology*, 24, 167-202.
- Nazzi, T., Bertoncini, J., Mehler, J. (1997). Language discrimination by newborns: towards an understanding of the role of rhythm. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 24, 1-11.
- Nottebohm, F. (1999). The anatomy and timing of vocal learning in birds. In: Hauser M. D., Konishi M, (Eds.), *The design of animal communication*. Cambridge, MA : MIT Press, 63 - 110.
- Piazza, M., Pinel, P., Le bihan, D., & Dehaene, S. (2007). A magnitude code common to numerosities and number symbols in human intraparietal Cortex, *Neuron* 53, 293-305.
- Piaget, J. (1952). *The child's conception of number*. London: Routledge & Kegan Paul.
- Piaget, J. (1980). *Language and learning*, In Piattelli- Palmarini, ed., *Language and learning: The debate between J. Piaget and N. Chomsky*, Cambridge, MA : Harvard University Press, 55-83.
- Pinker, S. (1994). *The Language Instinct*. New York: William Morrow.
- Qin, Y., Carter, C., Silk, E., Stenger, A., Fissell, K., Goode, A., & Anderson, J. (2004). The change of the brain activation patterns as children learn algebra equation solving, *PNAS*. 101 (15), 5686-5691.
- Quartz, S. R. & Sejnowski, T. J. (1997). Neural basis of cognitive Development: A constructivist manifesto. *Behav. Brain Sci.* 71, 708-812.
- Quine, W. V. O. (1960). *Word and object*. Cambridge, MA : MIT Press.
- Rivera, S., Reiss, A., Eckert, M. & Menon, V. (2005). Developmental changes in mental arithmetic: Evidence for increased functional specialization in the left inferior parietal cortex. *Cerebral Cortex*, 15, 1779-1790.
- Roskies, A. L. (1999). The binding problem. *Neuron*, 24, 7-9.
- Sadato, N., Pascual-Leon, A., Grafman, J., Deiber, M.P., Ibanez, V., & Hallet, M. (1998). Neural networks for Braille reading by the blind. *Brain*, 121, 1213-29.
- Samuels, R. (2004). Innateness in cognitive science. *Trends in cognitive science*, 8 (3), 136-141.
- Schlaggar, B. L, O'Leary, DDM (1991). Potential of visual cortex to develop arrays of functional units unique to somatosensory cortex. *Science*, 252, 1556-1560.
- Singer, W. (1999). Neuronal Synchrony: A versatile code for the definition of relations? *Neuron*, 24, 49-65.
- Spelke, E. S., & von Hofsten, C. (1986). Do infants reach for objects? A reply to Stiles-Davis. *Journal of Experimental Psychology: General*, 115, 98-100.
- Van Praag, H., Christie, B. R., Sejnowski, J., & Gage, F. H. (1999). Running enhances neurogenesis, learning and long term potentiation in mice. *Proceedings of the National association of Sciences USA*.
- Whalen, J., McClosky, M., Lindemann, M. & Bouton, G. (2002). Representing arithmetic tables facts in memory: Evidence from acquired impairments, *Cognitive Neuropsychology*, 19 (6), 505-522.
- Wynn, K. (1992). Addition and subtraction by human infant. *Nature*, 358, 749-750.

Neurobiological Aspects of Epistemology and Brain Areas related to Mathematical Activities

Kim, Youn Mi (Hongik University)

In this article three types of neuro- biological epistemology have been studied and applied to mathematics. Nativism or innatism is favored by many evolutionary psychologists and some mathematicians. They believe domain specific brain functions or modules, particularly language faculty and number instinct in infants. Number/mathematical cognition is a new research area and scientists try to localize areas related with mathematics. Selectionism has adopted Darwinism to synapse growth

and supports neuronal regression. Mathematical creativity can be explained using selectionism. Neural constructivism has originated from J. Piaget and supports neuronal/synapse growth in children or adults if adequate exercise and practise is given. Unlike Piaget, neural constructivists accepts the importance of structured experience for the reorganization of brain. Authors opinion is all these theories of epistemology is equally important and they all give insights on how the brain and self is made.

* **Key Words** : nativism/innatism(선천주의), neural constructivism(신경 구성주의), number cognition(수 인지), neuronal plasticism(신경 가소성)

논문접수: 2009. 10. 29.

논문수정: 2010. 2. 8.

심사완료: 2010. 2. 16.