인지과학, 제24권 제3호
Korean Journal of Cognitive Science
2013, Vol. 24, No. 3, 271～300.

수 감각의 인지신경학적 기반에 관한 연구 개관*

조 수 현†
중앙대학교 심리학과

사람과 동물은 수량(numerosity)의 대략적인 많고 적음에 대한 직관적 판단 능력을 가지고 태어난다. 이를 대략적 수 감각(이하, 수 감각, number sense)이라 한다. 수 감각은 오래 전부터 동물의 수렵, 채취, 사냥 및 생존에 필수적인 능력으로 진화된 것으로 추정된다. 선행 연구에 따르면, 수학 발달 장애를 가진 아동은 수 감각이 정상적인 아동에 비해 매우 둔감하다. 반대로, 수 감각이 민감한 사람들은 수학적 성취도가 더 높다. 이러한 결과는 생애 초기부터 발달하는 수 감각 표상의 정확도가 학령기 이후 숫자에 기반한 수학적 인지 발달의 근간이 된다는 가설을 뒷받침한다. 최근 연구들은 수 감각 훈련을 통해 수학 성취도의 향상과 수학 관련 뇌 기능의 변화를 가져올 수 있는지를 검증하고 있다. 한편, 수량은 불연속적인 양(discrete quantity)으로서 길이, 면적, 시간 등 연속적인 양(continuous quantity)과 밀접한 관계가 있을 것으로 기대할 수 있다. 이와 같은 관점에서 수, 시간, 공간 등 다양한 차원의 양적인 표상의 정보처리는 후측 두정엽(posterior parietal cortex), 특히 두정 내 고랑(intraparietal sulcus, IPS)에 위치한 공통의 뇌 기제(common brain mechanism)에 기반한다는 가설이 대두되었다. 이 가설을 검증하는 실험적 증거와 후속 연구의 방향을 소개한다.

주제어 : 수, 연속적인 양, 수 감각, 수학 성취도, 베버 비율, 공간, 시간, 공통 양 이론

---

* 이 연구는 2013년도 한국 연구 재단의 지원을 받아 수행되었음(NRF-2012R1A1A1011872).
† 교신저자: 조수현, 중앙대학교 심리학과, 연구 분야: 인지 신경 과학, (156-756) 서울시 동작구 흑석동, Tel: 02-820-5816, E-mail: soohyun@cau.ac.kr

서 론

수량 판단은 두 가지 인지 능력에 기초한다. 첫째는 적은 수량(서너 개 이하)을 한 눈에 정확하게 파악하는 능력(subitization)이고[1], 둘째는 많은 수량을 대략적인 많고 적음으로 파악하는 능력이다[2]. 후자의 능력을 대략적 수 감각(approximate number sense, or number sense; 이하 수 감각)이라 한다. 신생아는 물론 비둘기, 돌고래, 원숭이를 포함한 여러 동물들은 수량의 대략적인 많고 적음을 순간적으로 판단할 수 있는 수 감각이 있다[2]. 수 감각은 동물이 타고나는 매우 기본적인 능력으로, 종(species)과 연령에 따라 그 정확도에는 차이가 있을 수 있으나, 12개가 4개보다 많다는 판단은 신생아와 동물들도 쉽게 할 수 있는 수 감각 판단의 예라 할 수 있다. 인간의 수 감각은 정교한 수량 비교 뿐 아니라, 대략적인 연산도 가능하게 한다. 예를 들어, 15개에 19개를 더하면 그 결과가 30-40개에 가깝고 80-90개가 되지는 않는다는 것을 세거나 계산하지 않고도 직관적으로 알 수 있다. 수 감각은 수량의 추정과 비교, 대략적 연산 능력에만 영향을 주는 데서 그치지 않고, 나아가 숫자를 사용한 수학적 성취도와도 관계된다는 실험적 증거들이 보고되고 있다[3-7]. 수 감각이 정확할수록 수학 성취도가 높다는 연구 결과는 수 감각의 정확도가 상징적인 숫자 표상과 숫자를 이용한 수학적 정보 처리의 근간이 된다는 가설로 이어져 연구자들의 관심을 받고 있다. 이와 관련하여, 수학 학습 장애가 불완전한 수 감각과 관계되는지 그리고 수 감각 훈련을 통해 수학 성취도를 향상시킬 수 있는지에 대한 연구도 진행 중이다. 그러나 현재까지 연구된 바에 의하면 수 감각과 수학 성취도와의 관계에 대하여 서로 일치하지 않는 결과들이 혼재하여 아직 명확한 결론을 내리기 어려운 상황이다. 또한, 수 감각을 측정하는 실험 방법 상의 문제점에 대한 이해를 통해 후속 연구에서는 이를 개선해야 할 것이다. 한편, 수량을 불연속적인 양이라고 생각할 때, 공간, 시간 등 다른 연속적인 양적 표상들과 매우 밀접한 관계가 있을 것으로 예상할 수 있다. 수, 공간, 시간이 공통의 표상 혹은 정보 처리 체계를 공유한다는 가설[8-10]이 제기되어 이를 검증하는 연구가 진행 중이다. 본 개관 연구에서는 먼저, 수 감각의 인지신경학적 특성, 수 표상의 뇌 기반(neural basis), 수 감각과 수학 성취도의 관계, 수 감각 훈련에 대한 연구들에 대하여 차례로 논의하고 마지막으로 수, 공간, 시간 등 다양한 차원의 양적 표

상이 공유하는 인지행동적 특징과 공통의 신경 체계의 존재 가능성에 대해 논의할 것이다.

수 감각의 인지신경학적 특성

수 감각의 범문화적(cross-cultural), 선언어적(prelinguistic) 특성 - 수 감각의 진화

수 감각이란, 수량의 많고 적음에 대한 근원적인 직관을 말하며 이는 성인 뿐 아니라 신생아와 동물들에게서도 공통적으로 관찰되는 타고난 인지적 능력이다[2]. 수 감각은 동물들이 과일을 채집할 때 열매가 더 많은 나무를 한 눈에 알아보도록 도와주고, 다른 무리가 침입해 올 때 적의 수가 자신이 속한 무리의 수보다 많은지, 적은지를 재빠르게 파악할 수 있게 한다. 원숭이들은 시각적으로 확인된 다른 원숭이의 개체 수와 청각적으로 구별 가능한 다른 원숭이의 목소리의 수가 일치하는지를 자발적으로 확인하는 능력을 타고 난다[11]. 비둘기들이 45개와 50개의 수량 차이를 구별할 수 있다는 연구 결과도 있다[12]. 태어난 지 몇 시간 되지 않은 신생아들도 청각 자극의 빈도와 시각 자극의 개수가 일치하는지 아닌지를 자발적으로 구별한다[13]. 이러한 일련의 증거들은 인간과 동물에게서 공통적으로 발견되는 대상의 수(numerosity)에 대한, 감각 양상(modality)을 초월한 자발적인 탐지(spontaneous detection) 및 변별(differentiation) 능력이 있음을 증명하는 실험적 증거들이다. 인간 및 고등 동물의 수 감각은 자발적 수 탐지에서 더 나아가 대략적인 수의 비교와 대략적인 덧셈, 뺄셈까지 가능하게 한다[14, 15].

수 감각은 진화된 능력으로서 범문화적이고 언어나 교육에 의존하지 않는 능력으로 간주된다. 한 선행 연구에 의하면, 수학 교육을 받은 적이 없고 5보다 큰 수에 대한 단어를 가지고 있지 않은 토착 부족민(아마존 강 주변 Munduruku 부족)도 수 십 개 범위 내의 수량 변별과 대략적인 덧셈 능력이 일반인과 비교할 때 큰 차이가 없었다[16]. 또 다른 연구에 의하면 '하나', '둘' 다음에는 '많다'로 수량을 표현하는 피라하(Piraha) 부족민의 경우, 비록 시각적 대응(visual matching)과제로 측정한 수량 추정(estimation) 수행이 3개 이상의 수량에 대하여 매우 저조하였으나, 수량 추정 오류의 패턴을 분석한 결과, 수 감각의 민감도 자체는 수학 교육을 받는 일반 성인들과 크게 다르지 않았다[17]. 이러한 결과들은 많은 수량에 대한 추정을

기초로 한 대략적 수 감각은 언어 혹은 수학 교육에 의존하지 않는 것으로 해석할 수 있으며, 수 감각이 진화된 능력이라는 이론을 뒷받침한다.

수 변별의 정신물리학 - 베버의 법칙

수(량)의 많고 적음에 대한 비교 판단은 두 개의 수량 혹은 숫자 간의 차이가 클수록 더 정확하고 빠르게 이루어진다. 예를 들어, 2개와 4개를 구별하는 것(수량 간 거리=2)은 2개와 6개를 구별하는 것(수량 간 거리=4)보다 어렵다. 이것이 수 감각의 주요 특성 중의 하나인 거리 효과(distance effect)이다. 한편, 같은 거리라 하더라도, 많은 수량 간의 비교는 적은 수량 간의 비교보다 어렵다. 예를 들어, 17개와 19개를 구별하는 것(수량 간 거리=2)은 2개와 4개를 구별하는 것(수량 간 거리=2)보다 어렵다. 이 현상을 크기 효과(size effect)라 한다. 거리 효과와 크기 효과를 종합하면, 수량 간 비교 판단은 비교되는 수량의 절대값에 비례하여 수량 간 차이가 커져야 가능하다는 것을 할 수 있다. 다시 말해, 수 감각의 민감도 역시 정신물리학(주관적인 감각의 강도는 물리적 자극의 강도의 로그 값에 비례한다)에서 밝혀진 바와 마찬가지로 베버의 법칙(Weber's law or Weber-Fechner's law)을 따른다. 변별 가능한 최소한의 수량 차이는 베버 비율(weber fraction)로 표현될 수 있다. 이러한 현상에 착안하여, Dehaene은 수 감각이 아날로그적인 내적 수 표상의 특성을 반영한다고 주장한다[2]. 그는 내적 수 표상을 '내적 수 직선(mental number line)'이라 명명하고, 내적 수 직선 상의 수는 작을수록 왼쪽에, 클수록 오른쪽에 배열된다고 가정한다. 이러한 배열은 글을 왼쪽에서 오른쪽으로 써 나가는 언어 문화권에서 더욱 일반적이다[18, 19]. Dehaene의 이론에 따르면, 내적 수 직선 상의 수들은 일련의 정규 분포로 표상된다. 예를 들어, 40개의 수량에 대한 내적 수 표상은 그림 1과 같이 표현할 수 있다. Dehaene의 이론에 따르면, 수량이 커질수록 표상이 부정확해지는 이유(크기 효과)는, 내적 수 직선 상의 수 표상들이 절대값이 커질수록 수 간 간격이 감소하여 수량 표상(정규 분포)들이 서로 많이 겹쳐지기 때문이라고 설명한다. 즉, 내적 수 직선 상의 수들은 로그 함수 형태로 점차 그 간격이 압축되는 척도(logarithmically compressed scale)을 따른다고 가정한다[20]. 한편, Gallistel 과 Gelman(2000)은 내적 수 직선의 특성에 대한 다른 이론을 제시하였다. 그들의 이론에서는, 내적 수 직선의 값들은 선형적 척도(linear scale)를 따르므로 수 간 간격은

일정하나 절대값이 커질수록 각 정규 분포의 표준편차가 점차 증가(scalar variability)한다고 가정한다[21]. 이 이론에 따르면, 수량이 커질수록 표상이 부정확해지는 이유(크기 효과)는 절대값이 큰 수량을 표상하는 정규분포들은 폭이 넓어 서로 많이 겹치기 때문이라고 설명한다. 내적 수 표상에 대한 이 두 모형 모두 크기 효과, 거리 효과 등의 행동적 효과들을 설득력 있게 설명할 수 있는 이론으로서 각각의 지지 증거들을 통해 공존하고 있다.

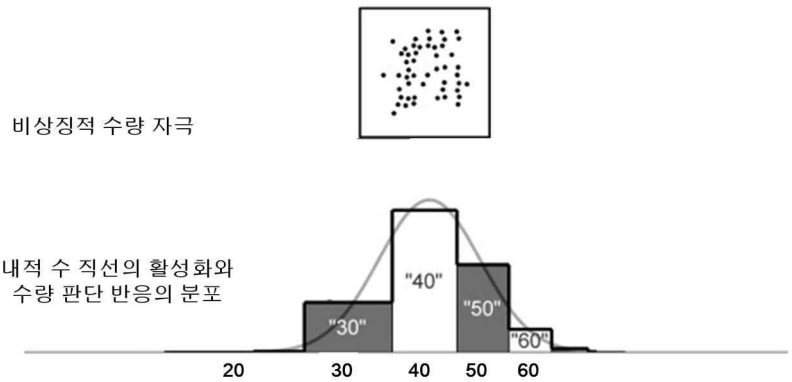

그림 1. Dehaene 의 이론에서 가정하는 가상의 내적 수 직선(mental number line)에서 40개의 수량에 대한 대략적 수 표상의 예시

수 감각의 발달. 수량 비교, 판단의 민감도는 발달 과정 속에서 점차 정교해진다(즉, 베버 비율이 작아진다). 태어난 지 몇 시간 밖에 되지 않은 신생아들의 수 감각의 민감도는 1:3 정도인 것으로 보고되었다[13]. Izard와 동료들의 연구에 따르면, 생후 몇 시간밖에 지나지 않은 시점에서 신생아들도 4개와 12개의 차이를 구별할 수 있었으며, 청각적으로 제시된 4개의 음절에 지속적으로 노출된 후에 시각적으로 제시된 4개와 12개의 물체 자극 중 4개를 선택적으로 더 오래 응시하였다고 한다. 반대로 청각적으로 제시된 12개의 음절에 지속적으로 노출된 후에는 시각적으로 제시된 4개와 12개의 물체 자극 중 12개를 선택적으로 더 오래 응시하였다고 한다(물론, 이 실험에서 4음절과 12음절의 청각 자극들 간 총 제시 시간은 동일하도록 통제되었다). 수량 비교 판단의 민감도는 발달 과정 속에서 점차 정교해

지며, 생후 6 개월 된 영아들은 1:2, 9-12 개월경에 2:3, 초등학교 3-4학년 경에 3:4, 후기 청소년기에는 7:8, 성인의 경우 9:10 이하의 비율도 구별 가능해진다[3, 4, 13, 22-24].

뇌 속의 수 표상과 수 감각의 뇌 기반

수 표상과 수 감각에 대한 관심이 높아짐에 따라 수학적 정보처리의 신경학적 기반에 대한 연구도 꾸준히 증가하고 있다. 동물 연구, 발달 심리학적 연구, 인류학적 연구 등 다양한 방법론을 통한 연구들의 결과를 종합적으로 고려할 때 수학적 정보처리 능력은 비언어적인 생물학적 기제에서 기원하는 것으로 추측되고 있다[25]. 수 정보처리를 위해 진화된 생물학적 기제가 자리한 곳은 후측 두정엽(posterior parietal lobe), 특히 두정 내 고랑(intra-parietal sulcus, IPS)일 것으로 추측되고 있다.

수량 정보 처리의 뇌 기반

신경심리학(neuropsychology). 수 표상과 수학적 정보처리의 뇌 기반에 대한 연구는 뇌 손상 환자에 대한 자료로부터 시작되었다. 두정-후두-측두 교차(parietal-occipital-temporal junction) 지점 혹은 전두엽에 손상이 있는 환자들은 흔히 후천적 계산 장애(acquired acalculia)를 보이는 것으로 보고되었다[26, 27]. 증상이 매우 심각했던 사례의 대표적인 예로, 후측 두정엽에 병변이 있는 Mar라는 환자는 수 비교, 중간 수 찾기(number bisection), 계산 등 전반적인 수학적 정보 처리에 중증 장애를 보였다. Mar는 '3 – 1= ?' 과 같은 쉬운 한 자리 수 뺄셈조차 수행하지 못하였다(그는 뇌 손상 이후 뺄셈의 의미가 무엇인지를 알지 못하겠다고 말하였다고 한다). 흥미롭게도, 이와 같은 Mar의 장애는 숫자를 이용한 정보 처리에 국한되었다. 예를 들어, 숫자가 아닌 알파벳이나 요일, 달(month) 등을 이용한 비교 혹은 중간 찾기(bisection; 예를 들어, "1월과 5월의 중간에 있는 달은?") 등의 과제는 무리 없이 수행할 수 있었다[28]. 이 밖에도 후측 두정엽에 병변이 있는 환자들은 수학적 부호를 헷갈리고, 사칙 연산은 물론 세 자리 이상의 숫자를 읽지 못하는 등 수학 정보 처리에 폭넓은 장애를 보인다고 한다[29, 30]. 이처럼 뇌 손상 환자들의 사례를

통해 일관되게 확인된 사실은, 수에 대한 지식과 다른 의미적 지식(semantic knowledge)이 이중 해리(double dissociation)된다는 것이다. 즉, 전두-측두엽에 병변이 있는 환자들은 일반적으로 의미적 지식에 대한 기억에 장애를 보이지만 수와 관련한 지식에는 장애를 보이지 않는다. 반대로, 후측 두정엽에 선택적 손상이 있는 환자들은 수와 관련한 정보처리에 장애를 보이지만, 일반적인 의미적 기억에는 문제가 없었다[28, 30, 31].

뇌 병변은 비교적 넓은 영역에 걸쳐 일어나기 때문에 세부적 뇌 영역과 특정 뇌 기능 간의 구체적인 인과 관계를 밝히기는 어렵다. 보다 구체적으로 국소 뇌 영역과 세부적 수학적 정보 처리와의 관계에 대한 단서는 동물을 이용한 전기생리학(electrophysiology)과 사람을 대상으로 한 뇌 영상 연구들로부터 얻어지기 시작하여 최근에는 가상의 병변(virtual lesion)을 유발할 수 있는 경두개 자기 자극(transcranial magnetic stimulation, TMS) 기법을 통해 연구되고 있다. 전기생리학과 기능적 자기 공명 영상(fMRI), 경두개 자기 자극 기법을 이용한 뇌 연구를 통해 수 감각과 수에 대한 표상(number representation)은 두정엽, 특히 두정 내 고랑과 깊은 관계가 있음이 밝혀지고 있다[31, 32].

전기 생리학(Electrophysiology). 원숭이 뇌를 이용한 전기 생리학적 실험 결과, 두정 내 고랑 부근의 세포들은 특정 개수의 점 자극을 선호하는 특성을 보인다. 예를 들어, 5개의 점을 가장 선호하는 세포의 경우, 점의 개수가 5개일 때 발화율이 가장 높으며, 점의 개수가 4개 혹은 6개일 때는 다소 발화율이 낮아지고, 점의 개수가 5개에서 더 멀어질수록 발화율이 더 감소하는 조율 곡선(tuning curve)을 보인다[33, 34]. 물체의 수량에 따라 발화율이 체계적으로 조절되는 세포들을 '수량 신경 세포'(numeron)라 한다. 수량 신경 세포들은 각기 특정 수량에 대한 필터(filter)라고 생각할 수 있다. 원숭이의 전두엽에서도 수량 신경 세포가 발견되었으나, 이 세포들의 발화 시작 시간(latency)이 두정 내 고랑에서보다 느리기 때문에 자극으로부터 수량 정보를 직접 추출하기보다 수량 정보를 두정엽 세포들로부터 전달받는 것으로 추정하고 있다[33]. 흥미롭게도, 수량을 로그 함수 척도로 변환하면 수량 신경 세포 반응의 조율곡선이 대칭적인 정규분포의 형태가 되어 Dehaene(2007)이 가정한 내적 수 표상의 형태와 일치하게 된다[2].

특정 수량에 최대 반응을 보이는 수량 신경 세포들은 선호하는 수량의 크기 순서대로 나란히 배열되어 있음이 관찰되었다[35, 36]. 이는 세포 수준에서 행동적 반응에서 관찰된 거리 효과(distance effect)에 대한 명확한 설명을 제공한다. 수량 신경 세포의 반응이 행동적 수행과 직결된다는 또 하나의 증거는 수량 비교 과제 수행 시 원숭이들이 수량 판단 오류를 범한 시행에서 해당 수량을 선호하는 세포의 반응이 현저하게 저하되어 있었다는 것이다[35, 36]. 다시 말해, 원숭이의 수량 신경 세포가 제대로 반응하지 못한 시행에서는 행동적으로 오류를 범했다고 할 수 있다. 두정엽 내의 수량 정보 처리 관련 뇌 활동은 태어난 지 3 개월 된 영아들에게서도 발견되었다[37].

기능적 자기 공명 영상(fMRI). 인간을 대상으로 한 기능적 자기 공명 영상 연구에 따르면, 인간의 양반구의 두정 내 고랑은 전체 뇌 영역 중 유일하게 글자, 색, 숫자 등의 자극 중에서 숫자에 대하여 가장 큰 반응을 보였으며, 이러한 현상은 자극들을 시각적으로 제시한 경우와 청각적으로 제시한 경우 모두에서 관찰되었다[38]. 또한 양반구의 두정 내 고랑은 특정 수량의 점 자극의 반복적 제시에 의한 억제 효과(repetition suppression)와 탈습관화(dishabituation) 효과가 관찰된 유일한 뇌 영역이었다[39]. 이러한 일련의 결과들은 숫자나 수량을 나타내는 시각 자극을 수동적으로 보기(passive viewing)만 하더라도(글자나 색깔 자극을 사용했을 때보다) 두정 내 고랑의 활동성이 증가함을 의미한다. 따라서 수량 정보 처리와 관련한 두정 내 고랑의 활동은 과제 수행에 필연적으로 따르는 작업 기억이나 시각적 주의 기능으로 인한 것이 아니라 수량 정보 처리 자체에 의한 것임을 확인할 수 있다. 또한, 두정 내 고랑에서는 거리 효과, 베버의 법칙과 같은 수 감각의 정신물리학적 특성을 반영하는 신경 활동 패턴이 일관되게 관찰된다[40-42]. 두정엽 내의 수량 정보 처리 관련 뇌 활동은 4살 아동에게서도 발견되었다[43]. 따라서, 이는 상징적 숫자 학습이 이루어지기 전부터 수량 정보 처리 기제로서 두정엽이 관여되는 것으로 해석할 수 있다.

물론 두정 내 고랑 영역은 수 표상과 수 정보 처리 뿐 아니라 다양한 감각, 운동 및 인지 기능과 관계되는 영역이다. Simon과 동료들(2002)의 연구에 의하면, 두정엽은 안구 및 시각적 주의의 이동, 손가락으로 가리키기(finger pointing), 손으로

쥐기(hand grasping) 등의 공간적인 운동 과제와 음소 탐지(phoneme detection)와 같은 언어적 과제의 수행에도 관계된다. 저자들은, 이 중 특히 두정 내 고랑에 계산(calculation only), 계산과 언어(calculation and language), 손을 이용한 과제(manual tasks), 안구 이동, 시각적 주의의 이동, 가리키기(pointing) 그리고 쥐기(grasping) 등을 아우르는 네 가지 시공간적 기능을 담당하는 영역이 나란히 배치(juxtapose)되어 있는 것으로 해석하였다[44]. 이 논문에 언급된 후측 두정엽 영역들은 공통적으로 중간 대뇌 동맥(middle cerebral artery)의 한 갈래인 각이랑 동맥(angular gyrus artery)에 의해 영양을 공급 받는다. 따라서 이 영역의 손상은 쓰기 장애(agraphia), 손가락 실인증(finger agnosia), 좌-우 혼동(left-right disorientation) 등의 증상을 보이는 거스트만 증후군(Gerstmann's syndrome)과 같은 장애를 초래할 수 있을 것으로 예상할 수 있다[26].

경두개 자기 자극 기법(TMS). 인간을 대상으로 뇌 활동과 인지 과정 간의 상관관계를 넘어 인과 관계를 확인할 수 있는 방법으로 경두개 자기 자극(이하 TMS) 기법이 있다. 몇 몇 TMS를 사용한 연구들에 따르면, 두정 내 고랑의 활동을 일시적으로 중단시킬 경우, 수량 정보 처리가 영향을 받는다. 좌뇌 혹은 우뇌 두정 내 고랑에 TMS를 실시한 결과, 수량 비교 수행이 저조해졌음을 보고한 연구들[45-47]이 있는 반면, Cappelletti와 동료들(2007)의 연구에서는 우뇌의 두정 내 고랑에 TMS를 실시한 결과, 수량 비교 수행이 향상된 경우도 있었다[48]. 이러한 증거들은 앞서 언급한 기능적 뇌 영상 연구 결과와 더불어 두정 내 고랑에 수량 정보 처리에 필수적인 표상/기제가 존재한다는 Dehaene의 이론(2003)을 뒷받침한다[31]. TMS를 이용한 두정 내 고랑의 수, 공간, 시간 정보 처리 기능에 대한 더 많은 연구들은 본 논문의 뒷부분(4.2.)에 더 자세히 다룰 것이다.

상징적 숫자(symbolic number)의 습득 과정에 대한 뇌 모형

수량 정보 처리 기제가 진화되어 온 오랜 시간과 비교하여, 상징적 언어를 이용한 숫자 정보 처리가 가능해진 것은 불과 수 천 년 전의 일이다. 따라서, 상식적으로 수 천 년 정도의 짧은 시간 동안 상징적 수학적 정보처리를 위한 뇌 기제가 별도로 발달하였을 가능성은 매우 희박하다. 연구자들은 상징적 수 정보 처리 기제

는 기존의 비상징적 수 정보 처리 기제를 활용하였을 것으로 추측하고 있다[49, 50]. 이러한 관점을 재활용(recycling hypothesis) 가설 혹은 재배치(redeployment hypothesis) 가설이라 한다[34에서 재인용].

숫자를 이용한 수학적 정보처리가 발달하는 과정에 대한 실험 연구는 아직 많이 이루어지지 않았다. 한 신경 생리학 연구에 따르면[51], 원숭이들에게 아라비아 숫자(예를 들어, "4")와 비상징적 수량(예를 들어, 4개의 점 자극)을 연합(association)하도록 훈련시키는 과정에서 전전두엽의 세포들이 선호하는 수량과 연합된 숫자에 대해서도 선택적인 반응을 나타내기 시작하였다. 이러한 결과는 상징적 숫자의 의미를 습득하는 과정에 전전두엽이 관여됨을 의미한다. 이러한 해석과 일치하는 몇몇 자기 공명 영상 연구에 따르면, 숫자를 배운 지 오래되지 않은 어린 아이들이 숫자에 대한 정보 처리를 할 때, 전전두엽의 활동성이 어른들과 비교하여 유의미하게 높았다[52, 53]. 연령의 증가와 함께 숫자 정보 처리가 점차 자동화됨에 따라 전두엽의 활동성은 감소하고, 특히 좌반구 후측 두정엽과 후두-측두엽(occipitotemporal lobe)의 활동성이 더 증가한다[54]. 성인의 수학 정보 처리 기제에 대한 뇌 인지 모형에는 수 표상을 담당하는 두정 내 고랑[31]과 숫자와 수학적 연산 부호와 같은 상징적 기호를 빠르게 재인하고 처리하는 방추형 이랑(fusiform gyrus) 등 하측 측두엽(ventral temporal lobe) 영역이 포함된다[55, 56].

수 감각과 수학 성취도

수 감각의 개인차에 대한 최근 연구들에 따르면 수 감각의 민감도는 수학 성취도와 밀접한 관계가 있다[3, 57, 58]. 그러나, 한편에서는 수 감각과 수학 성취도 간의 상관관계에 대하여 다른 해석을 제시하고 있다. 이러한 연구들에 따르면, 수 감각의 민감도가 수학 성취도와 상관관계가 나타나는 이유는 수 감각을 측정하는 실험 과제가 인지 억제(cognitive inhibition) 기능을 유발시키며, 인지 억제 기능과 같은 집행 기능(executive function)이 수학 성취도와 관계되기 때문이라고 주장한다[59]. 이와 관련한 논의를 위해 먼저 수 감각 연구들에서 사용하는 실험 과제를 소개하고, 수 감각과 수학 성취도의 관계에 대한 상반된 주장에 대해 살펴보자.

수 감각의 측정

수량 비교 과제. 수 감각을 측정하는 가장 보편적인 방법은 수량 비교 과제이다. 수량 비교 과제에서는 여러 개의 점으로 구성된 두 집합을 짧은 시간 동안 동시에 제시하고 두 집합 중 수량이 더 많은 집합을 선택하도록 한다(그림 2). 두 점 집합의 수량 간 비율(numerosity ratio)이 1에 가까워질수록 수량 비교 과제의 난이도가 증가한다. 수량 비교 과제를 통해 수 감각의 민감도(베버 비율)을 측정하기 위해 다양한 수량 간 비율을 제시하여 각 개인이 안정적으로 수량 비교 판단을 수행할 수 있는 수량 간 비율을 구한다. 점 자극의 총 면적이나 개별 점의 크기 등 연속적인 시각적 변인들이 수량에 대한 오염 변인(confounding variable)이 되지 않도록 통제 조건을 고안한다. 예를 들어, 총 면적 통제 조건에서는 두 집합 간 점들의 총 면적이 동일하도록 통제된다(총 면적 통제 조건에서는 점들의 수량이 많을수록 점들의 평균 크기가 작아질 수밖에 없다는 한계가 있다). 평균 크기 통제 조건에서는 두 점 집합 간의 점들의 평균 크기가 동일하도록 통제된다(평균 크기 통제 조건에서는 수량이 많은 집합에서 점들의 총 면적이 더 커질 수밖에 없다는 한계가 있다). 이와 같이 수량 비교 과제에서는 독립변인인 수량의 효과를 오염시킬 수 있는 가외 변인들을 통제하는 통제 조건을 사용하지만, 언급한 바와 같이 통제 조건의 설계 역시 완벽하지 않다는 한계가 있다.

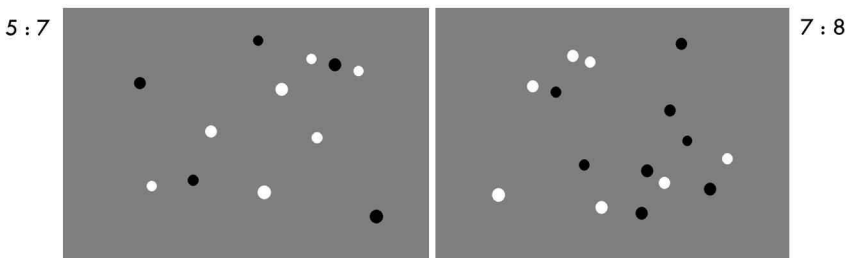

그림 2. 수 감각 측정 검사 자극의 예시.(왼쪽: 흑백 점 집합의 수량 간 비율이 5:7 인 자극, 오른쪽: 흑백 점 집합의 수량 간 비율이 7:8 인 자극)

이러한 한계를 인식하여, 불완전한 통제 조건 대신 특정 가외 변인의 영향이 수량 판단을 용이하게 하는 조건(congruent condition), 수량 판단에 영향을 주지 않는

조건(neutral condition), 수량 판단을 방해하는 조건(incongruent condition)을 사용하여 수량 비교 실험을 고안하기도 한다[59-61]. 그러나 이러한 실험 조건 역시 한 번에 하나의 가외 변인의 영향만을 체계적으로 통제하고, 다른 가외 변인의 영향을 체계적으로 통제하지 못하는 한계가 있다(예를 들어, 수량과 총 면적이 정적으로 상관될 경우(congruent) 개별 점의 크기는 수량과 무관하거나(neutral) 부적으로 상관될(incongruent) 수 있다).

수 감각 민감도의 계산. 수 감각 과제를 통해 획득한 정확도 자료를 이용하여 각 피험자의 수 감각의 민감도를 베버 비율로 계산할 수 있다[3]. 베버 비율의 계산 과정은 다음과 같다. 먼저, 각 피험자에 대하여 비율 별 수행의 정확도를 [수식 1]의 함수로 모델링하여 오차를 최소화하는 w값을 구한다. 이 때 n_1은 한 집합의 원소의 개수, n_2는 다른 한 집합의 원소의 개수이며, $erfc(x)$는 표준 정규분포를 적분할 때 사용하는 보편적인 오차 함수이다.

[수식 1] 수행의 정확도 $= 1-\frac{1}{2}erfc(\frac{n_1-n_1}{\sqrt{2}w\sqrt{n_1^2+n_2^2}})$

수 감각과 수학 성취도의 관계

수 감각은 대략적인 수 추정, 비교, 계산 등에만 관여되는 능력이 아니라 숫자를 이용한 계산 및 수학적 성취의 근간이 된다는 연구 결과들이 보고되고 있다[2, 3, 62]. 아이들은 숫자에 대해 배우기 시작할 때 낯선 상징(symbol)인 이 숫자들을 이미 머리 속에 가지고 있던 수량에 대한 내적 표상에 대응시킨다[49, 63, 64]. 따라서 숫자의 크고 작음, 상대적 순서, 숫자 간 거리 등에 대한 새로운 표상은 아동이 어린 시절부터 비상징적인 내적 수 표상을 얼마나 정확하게 확립하고 있었는지에 영향을 받지 않을 수 없다[58]. 최근에 발표된 연구에 따르면, 유치원부터 14살까지의 종단적 수학 성취도 점수가 14세에 측정한 수 감각의 민감도와 종단적으로, 일관된 상관관계가 있었으며[3], 유치원 시기에 측정한 수 감각의 민감도가 6개월 후 혹은 6세의 수학적 학습 성취도를 예측할 수 있다는 결과도 발표되었다[5, 57]. 또한, 유치원과 고등학교, 대학교 시기에 측정한 수 감각의 개인차가 동 시기

에 측정한 수학 능력과 유의미한 관계가 있었다[4, 6, 7]. 이러한 일련의 연구 결과들에 따르면, 비상징적인 수 감각은 숫자에 대한 학습과 이를 이용한 정보 처리의 기초를 제공하여 수학 성취도에 영향을 주는 것으로 해석할 수 있다.

그러나 수 감각과 수학 성취도 간에 상관관계를 발견하지 못한 연구들도 있다[65-67]. 선행 연구 결과 간의 불일치에 대해 여러 연구자들이 아직 명확한 설명이 제시되고 있지 못하지만, 수 감각의 측정 절차, 수학 성취도 검사의 특성, 피험자의 연령대에 따라 결과가 달라질 수 있다는 가능성을 고려해 볼 수 있다[67]. 저자의 연구실에서는 수 감각 측정 방법, 차폐 자극의 제시 여부, 수학 성취도 측정 문항의 특성 및 피험자의 연령을 달리하여 수 감각과 수학 성취도의 관계에 대한 연구를 진행하고 있다[68, 69].

수 감각과 수리 학습 장애. 수리 학습 장애(mathematical learning disability 혹은 dyscalculia)에 대한 연구들에 따르면, 수리 학습 장애를 가진 아동들은 수 감각의 민감도가 정상 아동과 비교하여 매우 저조하다고 한다[57, 62, 70-72]. 발달성 수리 학습 장애 아동들은 정상 아동과 비교할 때 수 감각의 발달이 매우 더뎌 10세에 측정한 베버 비율이 정상적으로 발달하는 5세 아동의 베버 비율과 유사한 것으로 드러났다[57, 62]. 또한, 수리 학습 장애를 가진 아동은 수 감각이 부정확할 뿐만 아니라 정상 아동과 비교할 때 수 추정(numerical estimation) 과제에서 많은 수량에 대한 과소 추정(underestimation) 오류(로그 함수 모양의 수 추정)가 향상되는 속도가 더디다[73]. 이러한 연구 결과들은 수 감각이 수학 성취도와 관계된다는 이론을 뒷받침하는 증거들을 제공한다.

뇌 영상을 이용한 연구 결과에 의하면, 수리 학습 장애 아동 집단에서는 수 감각의 신경학적 기전으로 알려진 두정 내 고랑의 회색질(gray matter)의 밀도가 감소되어 있으며[74], 수 비교(numerosity comparison) 과제에서 두정 내 고랑에서 측정된 신경 신호에서 거리 효과 및 수학적 정보 처리의 난이도에 따른 신경 신호 조절(modulation) 효과가 나타나지 않았다[70, 75-78]. 최근 확산 텐서 영상(Diffusion tensor imaging) 기법을 이용한 연구에서는 수리 학습 장애를 지닌 10세 아동 뇌의 회백질 중 두정 내 고랑과 연결된 상측 종속 다발(superior longitudinal fasciculus)의 발달 정도가 동일 연령대의 정상 아동과 비교할 때 더 저조하였다고 한다[79]. 이러한 연

구 결과들은 수리 학습 장애가 수 감각과 관련한 인지신경학적 기전의 비정상적인 발달로 인해 나타날 수 있다는 이론을 뒷받침한다.

훈련을 통한 수 감각과 수학 성취도의 향상

수리 학습 장애가 수 감각의 손상으로 인해 나타난다는 이론에 입각하여 수 감각 훈련을 통한 초등학생의 수학 성취도 향상에 대한 연구가 진행 중이다. 현재까지 발표된 아동 훈련 연구는 아직 몇 건 밖에 되지 않는다[72, 80, 81]. 그러나 이들 연구 간의 훈련 효과에 대한 결과가 일치하지 않았으며 표본 수의 부족 등 방법론적 한계가 있었다. 성인을 대상으로 실시된 최근의 한 훈련 연구에 따르면[82], 두 개의 점 집합을 이용한 대략적 연산(덧셈, 뺄셈) 훈련은 숫자를 이용한 계산 수행을 향상시키는 효과가 있었다. Kucian과 동료들의 연구(2011)에서는 수학 발달 장애 아동들이 수 혹은 수량에 대하여 더 정확한 내적 표상을 형성하도록 컴퓨터 게임과 같은 인터페이스를 디자인하여 우주선의 몸체에 나타난 연산을 수행하고 답에 해당하는 수 직선 상의 위치에 우주선을 이동시키도록 하였다[72]. 5주 간의 훈련 결과 아동들은 더 정확한 내적 수 표상을 지니게 되었고, 수학 연산 수행도 더 높아졌다고 한다. 그러나, 이 연구에서 확인된 수학 성취도의 향상이 내적 수 직선 훈련으로 인한 것인지, 아니면 훈련 중 연산을 반복적으로 실시하였기 때문인지를 구별할 수 없다는 한계가 있다. Wilson과 동료들의 연구에서는 수량 비교 훈련 및 수와 공간의 관계성, 비상징적인 수량과 그에 대응하는 숫자의 반복적 연합 및 작은 숫자를 이용하여 연산의 개념을 이해시키는 집중 훈련을 5주간 실시하였다[80]. 그 결과, 수량 비교 및 수량 추정의 속도가 증가하고, 뺄셈의 정확도가 향상하는 등의 효과가 있었으나 덧셈을 비롯한 일부 영역에서는 훈련의 효과가 나타나지 않았다.

수 감각 훈련을 통한 수학적 성취도 향상 효과에 대한 검증은 충분한 표본 수를 확보하고 훈련 기간을 충분히 해야 할 뿐 아니라, 통제 처치 즉, 종류가 다른 인지 훈련과의 비교 검증이 필요하다. 수학적 학습 장애에 대한 훈련 프로그램의 실용화에 앞서 수학적 성취도 향상에 대한 수 감각 훈련이 일반적인 인지 훈련과 비교하여 효과가 더 큰 지, 수학 성취도 향상에 가장 효과적인 훈련 기법은 무엇인지를 이해하는 것이 선행되어야 한다. 나아가 훈련 종료 후 효과가 장기적으로

지속되는지, 장기적 효과가 있다면 시간의 흐름에 따른 추이는 어떠한지에 대한 검증도 필요하다.

최근에 발표된 한 연구에 따르면, 하나, 둘 이상의 수량을 나타내는 단어가 사용되지 않는 아마존 강 부근 문두루쿠(Munduruku) 부족민들 중 교육을 받은 집단과 전혀 교육을 받지 않은 집단 간에 수 감각의 민감도에 유의미한 차이가 있었다고 한다[83]. 이는 비록 실험적으로 훈련의 효과를 검증한 연구는 아니지만, 교육이 수 감각의 민감도에 영향을 줄 수 있다는 가능성을 확인시켜준다고 해석할 수 있다. 물론, 이 연구는 향상된 수 감각의 민감도가 수학 성취도의 향상을 가져올 수 있는지에 대한 가능성을 보여주지는 않는다는 제한점이 있다.

수, 시간, 공간 - 공통의 양 체계(common magnitude system)

수량은 불연속적인 양으로서 연속적인 양과 밀접한 관계가 있을 것으로 예상할 수 있다[21]. Walsh와 동료들[8, 9]의 공통 양 이론(A Theory of Magnitude, ATOM)에 따르면 시간, 공간 그리고 수 표상은 공통의 양 체계(a common magnitude system)에 의해 인지된다(그림 3의 A). 수와 공간 간의 관계성에 대한 발견은 비교적 오래 전부터 주목을 받아왔다. 예를 들어, 공간-시간의 반응 코드 연합 효과(Spatial-Numerical Association of Response Code Effect, SNARC Effect)는 수에 대한 내적 표상이 공간적으로 배열되어 있음을 알 수 있게 한다[84]. 공간-수의 반응 코드 연합 효과란, 작은 수 혹은 적은 수량에 대한 반응은 왼손으로, 큰 수 혹은 많은 수량에 대한 반응은 오른손으로 할 때 반응 시간이 짧고 정확도가 높은 현상을 말한다.

Cohen Kadosh와 동료들은 또 다른 가능성으로, 서로 다른 양적 표상은 각기 독립적인 표상 체계를 지니지만, 그들 간에 서로 부분적으로 공유되는 부분이 존재할 수 있다고 주장한다(그림 3의 B). Cohen Kadosh와 동료들의 이론에 따르면, 서로 다른 양의 표상과 처리와 관련된 뇌 영역들이 부분적으로 겹칠 것으로 예상하였다. 저자들은, 이와 같은 뇌 영상 연구 결과가 관찰될 경우, 이는 서로 다른 양적 표상이 각기 독립적인 표상 체계를 지니나 공통의 처리 기제(common operational mechanism)를 공유한다는 것을 의미할 수도 있다고 덧붙였다[85]. 이보다 더 극단적

으로 공통 양 이론에 반대되는 이론도 존재한다. Moyer와 Landauer(1967)는 수, 크기, 시간 등 서로 다른 차원의 양에 대한 감각은 각기 다른 인지신경학적 체계(multiple magnitude system)에 기반한다고 주장한다[86에서 재인용; 그림 3C).

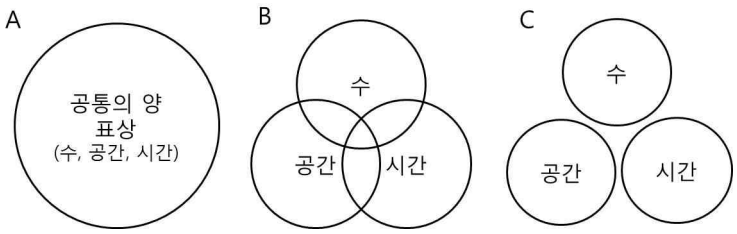

그림 3. 수, 공간, 시간 표상 간의 관계에 대한 모형. (A) 수, 공간 시간이 공통의 표상 체계에 기반한다는 모형. (B) 수, 공간 시간에 대한 독립적인 체계가 존재하나 서로 공유되는 표상/처리 기전이 존재한다는 모형. (C) 수, 공간 시간이 각기 독립적인 체계에 기반하며 서로 공유되는 부분이 존재하지 않는다는 모형.

현재, 수, 공간, 시간 표상 간의 관계성에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 각기 다른 이론을 지지하는 실험적 증거들이 혼재하고 있다. 이 중 수, 공간, 시간 에 대한 공통의 체계가 있다는 것을 밝히기 위한 방법으로 수, 시간, 공간 표상 간의 상호작용을 검증한 실험들을 소개한다.

수, 시간, 공간 표상 간의 상호작용

Stavy and Tirosh(2000)의 연구에 따르면 아동들은 시각적 크기가 큰 사물의 이동 속도를 더 빠르게 지각하고, 더 밝거나 크기가 큰 자극의 제시 시간을 더 길게 판단하는 편향을 보인다[87]. Xuan과 동료들(2007)의 연구에서는 성인들 역시 자극의 시각적 크기, 밝기(luminance)와 수량에 따라 제시 시간(duration)에 대한 판단이 달라지는 결과를 보고하였다[88]. Olivieri와 동료들(2008)의 연구에서는 작은 숫자의 제시 시간을 더 짧게, 큰 숫자의 제시 시간을 더 길게 지각하는 반응 편향에 대하여 보고하였다[89]. Rusconi와 동료들은 음높이(pitch height) 표상이 공간적으로 배열되어 있다는 공간-음 간 반응 부호 연합 효과(Spatial-Musical Association of Response Codes Effect, SMARC effect)를 보고하였다[90]. 이러한 결과들은 행동적 반응 수준에

서 서로 다른 종류의 양적 표상이 서로 독립적이지 않다는 것을 보여주지만, 그러한 관계성이 반드시 공유된 표상 때문이라는 것을 증명하지는 않는다. 공유된 표상에 대한 보다 직접적인 증거는 여러 연구에서 반복적으로 확인된 '크기 일치 효과(size congruity effect)'로부터 제공되었다.

수, 시간, 공간 간의 상호작용: 크기 일치 효과. 크기 일치 효과란, 두 숫자를 비교하는 과제에서, 숫자의 의미적 크기와 제시된 숫자의 물리적 크기가 일치할 때 더 정확하고 빠르게 반응하는 현상을 말한다[85]. 예를 들어, 3과 6을 비교하는 시행에서 그림 4의 (A)에서와 같이 의미적으로 큰 숫자인 6이 물리적으로 더 크게 제시되는 경우가 그림 4의 (B)에서와 같이 의미적으로 큰 숫자인 6이 물리적으로 더 작게 제시되는 경우보다 더 빠르고 정확한 숫자 비교 판단을 유발한다. 이러한 효과는 숫자와 밝기가 서로 일치 혹은 불일치하도록 조작한 실험에서도 동일하게 관찰된다[91]. 크기 일치 효과는 숫자의 의미적 크기에 대한 판단을 할 때 숫자의 시각적 크기나 밝기와 같은 연속적인 양이 자동적으로 함께 처리됨을 의미한다. 그러나, 이러한 효과는 숫자의 의미와 연속적인 양이 공통의 표상 체계를 공유한다는 것을 반영할 수도 있으나, 대안적으로 서로 다른 양적 표상을 비교할 때 (표상 체계 자체는 각기 독립적으로 존재하면서) 동일한 인지 처리 기제(예를 들어, 비교 판단과 반응 선택 과정)를 공유하는 것으로 해석할 수도 있다.

수, 시간, 공간 표상 체계의 뇌 기반

지금까지 행동 연구를 통해 수, 시간, 공간 표상이 서로 밀접한 관계가 있다는 증거들을 살펴보았다. 이러한 관계성은 무엇에 기인하는 것일까? 수와 수량 표상은 연속적인 양에 대한 공통의 표상으로부터 기원하는 것일까? 모든 양적 표상은 필연적으로 공간적 정보에 기반하는가? 이들은 매우 흥미로운 질문들로서 많은 연구자들이 그 해답을 찾기 위해 노력하고 있다. Walsh의 이론에 의하면 수, 시간, 공간은 하측 두정엽에서 감각-운동 변환(sensorimotor transformation)을 위해 동물이 필요로 하는 정보들로서 공통의 단위 체계(common metric system)에 의해 처리될 수밖에 없다고 주장한다[8]. 다시 말해, 동물이 시각적인 대상에 대하여 운동 반응을 할 때에 대상의 크기, 수, 속도, 거리 등에 대한 정보를 종합해야만 정확한 운동

반응을 위한 근육의 수축 프로그램을 계산할 수 있으므로, 수, 시간, 공간에 대한 공통의 기제가 존재할 것으로 가정한다. 현재, Walsh의 이론을 검증하기 위한 많은 후속 연구가 이어지고 있다.

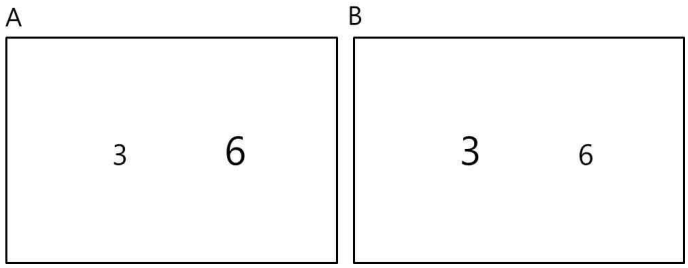

그림 4. 크기 일치 효과 검증을 위한 숫자 비교 실험. (A), 숫자의 의미적 크기와 물리적 크기가 서로 일치하는 조건, (B) 숫자의 의미적 크기와 물리적 크기가 서로 불일치하는 조건.

수, 시간, 공간 표상이 각기 독립적인 인지신경학적 체계를 지니는지 혹은 공통의 양 표상 체계가 존재하는지에 대하여 행동적 반응을 관찰하는 것만으로는 결정적인 정보를 얻을 수 없다. 최근 일련의 뇌 영상 연구들은 뇌 활동 신호에서 공통의 양 표상 체계의 존재를 확인할 수 있는지를 검증하고 있다. 이 연구들은 청각 자극의 제시 시간, 시각 자극의 크기나 길이 또는 밝기 등에 대한 비교 과제 수행 중 활동성이 증가하는 뇌 영역들을 비교함으로써, 서로 다른 종류의 양적 표상의 처리와 관계되는 공통의 뇌 영역을 찾고자 하였다. Pinel과 동료들(2004)은 인간의 두정 내 고랑에 수와 시각적 크기의 비교를 가능케 하는 공통된 인지신경학적 기전이 존재하나 수와 밝기는 서로 독립적으로 처리된다고 보고하였다[92]. 이러한 증거는 두정 내 고랑에 크기나 길이와 같은 시각적으로 연속적인 양과 수에 대한 공통의 인지신경학적 기전이 존재할 가능성을 뒷받침한다.

공통 양 이론을 검증할 수 있는 또 하나의 강력한 방법론은 TMS를 사용하는 것이다. Dormal과 동료들의 연구(2008)에서는 좌반구 두정 내 고랑에 대한 TMS는 수량 판단을 방해하였으나 시간에 대한 판단은 방해하지 않았으며, 우반구 두정 내 고랑에 대한 TMS는 수량과 시간 판단에 아무런 영향을 주지 않았다[46]. 그러나, 같은 연구자들의 후속 연구(2011)에서는 우반구 두정 내 고랑에 대한 TMS는 수량

과 길이 판단 모두를 방해하였다고 한다[47]. Cappelletti와 동료들(2007)은 좌반구의 두정 내 고랑에 TMS를 실시한 결과 수량 판단이 방해를 받았으나, 기울기 판단은 향상되었고, 우반구의 두정 내 고랑에 TMS를 실시한 결과, 수량 판단이 향상되는 반면, 기울기 판단은 방해를 받았다고 한다[48]. 이렇듯, 아직은 TMS를 이용한 연구의 수가 매우 적기 때문에, 좌반구 혹은 우반구 두정 내 고랑에 공통 양 체계가 존재한다거나 존재하지 않는다는 결론을 내리는 것은 시기 상조이다. Göbel과 동료들(2004)에 따르면, 수, 공간, 시간 표상의 처리에 대한 TMS의 효과는 각 연구에서 사용된 행동적 과제의 구체적인 특성과 맥락에 매우 민감하다고 한다[93]. 따라서, 명확한 결론을 내리기 위해서는 더 많은 연구와 면밀한 분석이 필요하지만, 뇌영상과 TMS 등 여러 연구 방법을 통한 보다 많은 수의 연구 결과들이 모여 두정 내 고랑과 수, 시간, 공간 공통의 표상 혹은 처리 기제의 존재에 대한 의문을 해소할 수 있을 것으로 기대한다.

단, 공통의 양 표상 체계를 검증하는 뇌 영상 연구 결과에 대한 해석을 할 때 유의해야할 사항들이 있다. 서로 다른 양적 표상에 대하여 동일한 뇌 영역(예컨대, 두정 내 고랑)에서 활동이 일어났다하더라도, 그것이 공유된 양적 표상 체계의 존재를 확인해주는 결정적인 증거라고 해석할 수는 없다. 왜냐하면, 첫째로, 이는 공유된 표상 체계가 아닌 공통의 인지적 처리 기제를 반영할 가능성이 있으며, 둘째로, fMRI의 공간적 해상도(spatial resolution)의 한계로 인해, 구별되지는 못하더라도 공통적으로 활성화된 부피소(voxel) 내에서도 서로 다른 양적 표상을 반영하는 신호가 복합적으로 측정되었을 가능성이 있기 때문이다. 반대의 경우도 마찬가지로, 서로 다른 양적 표상의 비교 과정에서 활성화된 뇌 영역에서 차이가 발견되더라도 (예컨대, 수량 비교에서 다른 양적 비교에서보다 두정 내 고랑 활동이 더 강하게 나타나는 것) 이 결과가 반드시 분리된 양적 표상 체계의 존재를 증명하는 증거로 해석할 수 없다. 왜냐하면, 서로 다른 양적 표상의 처리와 관련하여 뇌 활동 패턴의 차이가 나타난 이유가 표상의 독립성 때문이 아니라 비교 과정에서 시각적 주의 등 다른 인지 기능을 요하는 정도의 차이로 인한 것일 수 있기 때문이다. 앞으로 이어질 많은 후속 뇌 영상 연구 결과에 대하여 이러한 점을 유의하여 해석해야 할 것이다.

결 론

본 개관 연구에서는 수 감각의 인지신경학적 특성, 뇌 속의 수 표상, 수 감각과 수학 성취도와의 관계 그리고 수, 시간, 공간 표상 간의 관계에 대한 이론과 실험 결과들을 정리하였다.

요약하면, 수량의 대략적인 많고 적음에 대한 판단 능력인 수 감각은 인간과 동물의 생존에 필수적인 능력으로 진화되어 왔다. 수량 판단은 두 집합 간의 수량 차이가 클수록, 수량의 절대값이 작을수록 정확하다. 이를 거리효과, 크기 효과라 한다. 이러한 수량 판단의 정확도는 주관적 감각의 정신물리학에서 알려진 바와 같이 베버의 법칙을 따른다는 것이 확인되었다.

수 감각의 측정을 위해 가장 일반적으로 사용되는 실험 패러다임은 수량 비교 과제이다. 비교되는 두 수량 간의 비율 별 정확도를 이용하여 개인의 수 감각의 민감도를 베버 비율로 계산할 수 있다. 수량 비교 과제 수행 중 뇌 활동을 촬영한 결과, 두정 내 고랑 영역의 활동성이 증가하였다. 두정 내 고랑 영역의 뇌 활동 신호에서도 행동적 반응에서 나타난 거리 효과, 크기 효과가 확인되어 수 표상과 관련하여 핵심적인 역할을 하는 영역으로 추정되고 있다.

한편, 최근 일련의 연구들은 수 감각의 민감도의 개인차가 수학 성취도의 개인차와 상관관계가 있다는 결과를 보고하여 주목을 받고 있으며 많은 후속 연구들이 진행 중이다. 이와 관련하여 수학 학습 장애가 수 감각의 손상과 관련되는지에 대한 검증 및 수 감각의 향상 훈련을 통해 수학 성취도를 높일 수 있는지에 대한 연구가 이루어지고 있다. 더불어, 불연속적인 양을 나타내는 수 표상과 시간, 공간 등 연속적인 양을 나타내는 표상들이 공통의 양 체계를 공유한다는 이론이 제안되어 이를 검증하기 위한 많은 연구가 이어지고 있다.

수와 양에 대한 감각 및 표상의 인지신경학적 기전을 이해하는 것은 학술적으로 가치 있는 성과일 뿐만 아니라 나아가 수학적 성취도의 향상과 수학 학습 장애에 대한 효과적인 개입을 위한 기초를 제공하여 국가 경쟁력 향상에 기여할 것이다.

참고문헌

[1] Trick, L. M., & Pylyshyn, Z. W. (1994). Why are small and large numbers enumerated differently? A limited-capacity preattentive stage in vision. *Psychological Review, 101* (1), 80-102.

[2] Dehaene, S. (1997). The number sense. Oxford University Press, Penguin press, New York, Cambridge (UK).

[3] Halberda, J., Mazzocco, M., & Feigenson, L. (2008). Individual differences in nonverbal number acuity predict maths achievement. *Nature, 455* (7213), 665-668.

[4] Halberda, J., & Feigenson, L. (2008). Developmental change in the acuity of the 'Number Sense': The Approximate Number System in 3-, 4-, 5-, and 6-year-olds and adults. *Developmental Psychology, 44* (5), 1457-1465.

[5] Libertus, M. E., Feigenson, L., & Halberda, J. (2013). Is approximate number precision a stable predictor of math ability?. *Learning and Individual Differences, 25*, 126-133.

[6] Libertus, M. E., Feigenson, L., & Halberda, J. (2011). Preschool acuity of the approximate number system correlates with school math ability. *Developmental Science, 14* (6), 1292-1300.

[7] Libertus, M. E., Odic, D., & Halberda, J. (2012). Intuitive sense of number correlates with math scores on college-entrance examination. *Acta Psychologica, 141* (3), 373-379.

[8] Walsh, V. (2003). A theory of magnitude: common cortical metrics of time, space and quantity. *Trends in Cognitive Sciences, 7* (11), 483-488.

[9] Bueti, D., & Walsh, V. (2009). The parietal cortex and the representation of time, space, number and other magnitudes. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 364* (1525), 1831-1840.

[10] Cappelletti, M., Muggleton, N., & Walsh, V. (2009). Quantity without numbers and numbers without quantity in the parietal cortex. *Neuroimage, 46* (2), 522-529.

[11] Jordan, K. E., Brannon, E. M., Logothetis, N. K., & Ghazanfar, A. A. (2005). Monkeys match the number of voices they hear to the number of faces they see. *Current Biology, 15* (11), 1034-1038.

[12] Dehaene, S., Dehaene-Lambertz, G., & Cohen, L. (1998). Abstract representations of numbers in the animal and human brain. *Trends in Neurosciences, 21* (8), 355-361.

[13] Izard, V., Sann, C., Spelke, E. S., & Streri, A. (2009). Newborn infants perceive abstract numbers. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 106* (25), 10382-10385.

[14] Cantlon, J. F., & Brannon, E. M. (2007). How much does number matter to a monkey?. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes, 33* (1), 32-41.

[15] Flombaum, J. I., Junge, J. A., & Hauser, M. D. (2005). Rhesus monkeys (Macaca mulatta) spontaneously compute addition operations over large numbers. *Cognition, 97* (3), 315-325.

[16] Pica, P., Lemer, C., Izard, V., & Dehaene, S. (2004). Exact and approximate arithmetic in an Amazonian indigene group. *Science, 306* (5695), 499-503.

[17] Gordon, P. (2004). Numerical cognition without words: Evidence from Amazonia. *Science, 306* (5695), 496-499.

[18] Zebian, S. (2005). Linkages between number concepts, spatial thinking, and directionality of writing: The SNARC effect and the reverse SNARC effect in English and Arabic monoliterates, biliterates, and illiterate Arabic speakers. *Journal of Cognition and Culture, 5*, 165-190.

[19] Shaki, S., Fischer, M. H., & Petrusic, W. M. (2009). Reading habits for both words and numbers contribute to the SNARC effect. *Psychonomic Bulletin & Review, 16* (2), 328-331.

[20] Dehaene, S. (2003). The neural basis of the Weber–Fechner law: a logarithmic mental number line. *Trends in Cognitive Sciences, 7* (4), 145-147.

[21] Gallistel, C. R., & Gelman, R. (2000). Non-verbal numerical cognition: From reals to integers. *Trends in Cognitive Sciences, 4* (2), 59-65.

[22] Libertus, M. E., & Brannon, E. M. (2010). Stable individual differences in number discrimination in infancy. *Developmental Science, 13* (6), 900-906.

[23] Lipton, J. S., & Spelke, E. S. (2003). Origins of Number Sense Large-Number Discrimination in Human Infants. *Psychological Science, 14* (5), 396-401.

[24] Xu, F., & Spelke, E. S. (2000). Large number discrimination in 6-month-old infants. *Cognition, 74* (1), B1-B11.

[25] Nieder, A., & Dehaene, S. (2009). Representation of number in the brain. *Annual Review of Neuroscience, 32*, 185-208.

[26] Gerstmann, J. (1940). Syndrome of finger agnosia, disorientation for right and left agraphia and acalculia. *Archives of Neurology and Psychiatry, 44* (2), 398-408.

[27] Luria, A. R. (1966). The Higher Cortical Functions in Man. New York: Basic Books.

[28] Dehaene, S., & Cohen, L. (1997). Cerebral pathways for calculation: double dissociation between rote verbal and quantitative knowledge of arithmetic. *Cortex, 33* (2), 219-250.

[29] Ardila, A., & Rosselli, M. (2002). Acalculia and dyscalculia. *Neuropsychology Review, 12* (4), 179-231.

[30] Cipollotti, L., Butterworth, B., & Denes, G. (1991). A specific deficit for numbers in a case of dense acalculia. *Brain, 114* (6), 2619-2637.

[31] Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., & Cohen, L. (2003). Three parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychology, 20* (3-6), 487-506.

[32] Dehaene, S., Molko, N., Cohen, L., & Wilson, A. J. (2004). Arithmetic and the brain. *Current Opinion in Neurobiology, 14* (2), 218-224.

[33] Nieder, A. (2005). Counting on neurons: the neurobiology of numerical competence. *Nature Revieus Neuroscience, 6* (3), 177-190.

[34] Nieder, A., & Dehaene, S. (2009). Representation of number in the brain. *Annual Revieus in Neuroscience, 32*, 185-208.

[35] Nieder, A., & Miller, E. K. (2004). A parieto-frontal network for visual numerical information in the monkey. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, 101* (19), 7457-7462.

[36] Nieder, A., & Merten, K. (2007). A labeled-line code for small and large numerosities in the monkey prefrontal cortex. *Journal of Neuroscience, 27* (22), 5986-5993.

[37] Izard, V., Dehaene-Lambertz, G., & Dehaene, S. (2008). Distinct cerebral pathways for object identity and number in human infants. *PLoS Biology, 6* (2), e11.

[38] Eger, E., Sterzer, P., Russ, M. O., Giraud, A. L., & Kleinschmidt, A. (2003). A supramodal number representation in human intraparietal cortex. *Neuron, 37* (4), 719-725.

[39] Naccache, L., & Dehaene, S. (2001). The priming method: imaging unconscious repetition priming reveals an abstract representation of number in the parietal lobes. *Cerebral Cortex, 11* (10), 966-974, 2001.

[40] Pinel, P., Dehaene, S., Rivie're, D., & Le Bihan, D. (2001). Modulation of parietal activation by semantic distance in a number comparison task. *Neuroimage, 14* (5), 1013-1026.

[41] Piazza, M., Izard, V., Pinel, P., Le Bihan, D., & Dehaene, S. (2004). Tuning curves for approximate numerosity in the human intraparietal sulcus. *Neuron, 44* (3), 547-555.

[42] Hyde, D. C., & Spelke, E. S. (2009). All numbers are not equal: an electrophysiological investigation of small and large number representations. *Journal of Cognitive Neuroscience, 21* (6), 1039-1053.

[43] Cantlon, J. F., Brannon, E. M., Carter, E. J., & Pelphrey, K. A. (2006). Functional imaging of numerical processing in adults and 4-y-old children. *PLoS Biology, 4* (5), e125.

[44] Simon, O., Mangin, J.-F., Cohen, L., Le Bihan, D., & Dehaene, S. (2002). Topographical layout of hand, eye, calculation, and language related areas in the human parietal lobe. *Neuron, 33* (3), 475-487.

[45] Cohen Kadosh, R., Cohen Kadosh, K., Schuhmann, T., Kaas, A., Goebel, R., Henik, A., & Sack, A. T. (2007). Virtual dyscalculia induced by parietal-lobe TMS impairs automatic magnitude processing. *Current Biology, 17* (8), 689-693.

[46] Dormal, V., Andres, M., & Pesenti, M. (2008). Dissociation of numerosity and duration processing in the left intraparietal sulcus: A transcranial magnetic stimulation study. *Cortex, 44* (4), 462-469.

[47] Dormal, V., Andres, M., & Pesenti, M. (2011). Contribution of the right intraparietal sulcus to numerosity and length processing: An fMRI-guided TMS study, *Cortex, 48*, 623-629.

[48] Cappelletti, M., Barth, H., Fregni, F., Spelke, E. S., & Pascual-Leone, A. (2007). rTMS over the intraparietal sulcus disrupts numerosity processing. *Experimental Brain Research, 179* (4), 631-642.

[49] Verguts, T., & Fias, W. (2004). Representation of Number in Animals and Humans: A Neural Model. *Journal of Cognitive Neuroscience, 16* (9), 1493-1504.

[50] Piazza, M. (2010). Neurocognitive start-up tools for symbolic number representations. *Trends in Cognitive Sciences, 14* (12), 542-551.

[51] Diester, I., & Nieder, A. (2007). Semantic associations between signs and numerical categories in the prefrontal cortex. *PLoS Biology, 5* (11), e294.

[52] Ansari, D., Garcia, N., Lucas, E., Hamon, K., & Dhital, B. (2005). Neural correlates of symbolic number processing in children and adults. *Neuroreport, 16* (16), 1769-1773.

[53] Kaufmann, L., Koppelstaetter, F., Siedentopf, C., Haala, I., Haberlandt, E., et al. (2006). Neural correlates of the number-size interference task in children. *Neuroreport, 17* (6), 587-591.

[54] Rivera, S. M., Reiss, A. L., Eckert, M. A., & Menon, V. (2005). Developmental changes in mental arithmetic: evidence for increased functional specialization in the left inferior parietal cortex. *Cerebral Cortex, 15* (11), 1779-1790.

[55] Butterworth, B., Varma, S., & Laurillard, D. (2011). Dyscalculia: From Brain to Education. *Science, 332* (6033), 1049-1053.

[56] 조수현. (2013). 초기 수학 능력 발달과 인지 책략 변화 관련 종단적 뇌 활동 변화 분석. ***한국심리학회지: 인지 및 생물***, 25 (2), 173-200.

[57] Mazzocco, M. M., Feigenson, L., & Halberda, J. (2011). Preschoolers' precision of the approximate number system predicts later school mathematics performance. *PLoS One, 6* (9), e23749.

[58] Gilmore, C. K., McCarthy, S. E., & Spelke, E. S. (2010). Non-symbolic arithmetic abilities and mathematics achievement in the first year of formal schooling. *Cognition, 115* (3), 394-406.

[59] Gilmore, C., et al. (2013). Individual differences in inhibitory control, not non-verbal

number acuiy, correlate with mathematics achievement. *PloS One, 8* (6), e67374.

[60] Hurewitz, F., Gelman, R., & Schnitzer, B. (2006). Sometimes area counts more than number. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 103* (51), 19599-19604.

[61] Gebuis, T., & Reynvoet, B. (2011). Generating nonsymbolic number stimuli. *Behavior Research Methods, 43* (4), 981-986.

[62] Piazza, M., Facoetti, A., Trussardi, A. N., Berteletti, I., Conte, S., Lucangeli, D., Dehaene, S., & Zorzi, M. (2010). Developmental trajectory of number acuity reveals a severe impairment in developmental dyscalculia. *Cognition, 116* (1), 33-41.

[63] Gilmore, C. K., McCarthy, S. E., & Spelke, E. (2007). Symbolic arithmetic knowledge without instruction. *Nature, 447* (7144), 589-591.

[64] Ansari, D. (2008). Effects of development and enculturation on number representation in the brain. *Nature Revieus Neuroscience, 9* (4), 278-291.

[65] Holloway, I., & Ansari, D. (2009). Mapping numerical magnitudes onto symbols: The numerical distance effect and individual differences in children's mathematics achievement. *Journal of Experimental Child Psychology, 103* (1), 17-29.

[66] Inglis, M., Attridge, N., Batchelor, E. S., & Gilmore, C. (2011). Non-verbal number acuity correlates with symbolic mathematics achievement: But only in children. *Psychonomic Bulletin & Revieu, 18* (6), 1222-1229.

[67] Price, G. R., Palmer, D., Battista, C., & Ansari, D. (2012). Nonsymbolic numerical magnitude comparison: Reliability and validity of different task variants and outcome measures, and their relationship to arithmetic achievement in adults. *Acta Psychologica, 140* (1), 50-57.

[68] Chang, S. L. & Cho, S. (2013). Acuity for numerosity and length discrimination and how it relates to mathematical reasoning vs. arithmetic abilities. Poster presented at the *Annual Meeting of the Cognitive Neuroscience Society*. San Francisco.

[69] Park, Y. J., Chang, S. L., & Cho, S. (2013). Acuity for numerosity and continuous magnitude is associated with mathematical achievement in elementary school children. Poster presented at the *Annual Meeting of the Cognitive Neuroscience Society*. San Francisco.

[70] Price, G. R., Holloway, I., Räsänen, P., Vesterinen, M., & Ansari, D. (2007).

Impaired parietal magnitude processing in developmental dyscalculia. *Current Biology, 17* (24), R1042-R1043.

[71] Butterworth, B., & Laurillard, D. (2010). Low numeracy and dyscalculia: Identification and intervention. *ZDM Mathematics Education, 42* (6), 527-539.

[72] Kucian, K., Grond, U., Rotzer, S., Henzi, B., Schönmann, C., Plangger, F., Gälli, M., Martin, E., von Aster, M. (2011). Mental number line training in children with developmental dyscalculia. *Neuroimage, 57* (3), 782-795.

[73] Siegler, R. S., & Booth, J. L. (2004). Development of numerical estimation in young children. *Child Development, 75* (2), 428-444.

[74] Rotzer, S., Kucian, K., Martin, E., von Aster, M., Klaver, P., & Loenneker, T. (2008). Optimized voxel-based morphometry in children with developmental dyscalculia. *Neuroimage, 39* (1), 417-422.

[75] Isaacs, E. B., Edmonds, C. J., Lucas, A., & Gadian, D. G. (2001). Calculation difficulties in children of very low birthweight: A neural correlate. *Brain, 124* (9), 1701-1707.

[76] Molko, N., Cachia, A., Rivière, D., Mangin, J. F., Bruandet, M., Le Bihan, D., Cohen, L., & Dehaene, S. (2003). Functional and structural alterations of the intraparietal sulcus in a developmental dyscalculia of genetic origin. *Neuron, 40* (4), 847-858.

[77] Rivera, S. M., Menon, V., White, C. D., Glaser, B., & Reiss, A. L. (2002). Functional brain activation during arithmetic processing in females with fragile X Syndrome is related to FMR1 protein expression. *Human Brain Mapping, 16* (4), 206-218.

[78] Mussolin, C., De Volder, A., Grandin, C., Schlögel, X., Nassogne, M. C., & Noël, M. P. (2010). Neural correlates of symbolic number comparison in developmental dyscalculia. *Journal of Cognitive Neuroscience, 22* (5), 860-874.

[79] Kucian K, Ashkenazi SS, Hänggi J, Rotzer S, Jäncke L, Martin E, von Aster M. (2013) Developmental dyscalculia: a dysconnection syndrome? Brain Structure and Function. (in press)

[80] Wilson, A. J., Dehaene, S., Pinel, P., Revkin, S. K., Cohen, L., & Cohen, D. (2006). Principles underlying the design of "The Number Race," an adaptive computer game for remediation of dyscalculia. *Behavioral Brain Function, 2* (1), 19.

[81] DeWind, N. K., & Brannon, E. M. (2012). Malleability of the approximate number system: effects of feedback and training. *Frontiers in Human Neuroscience, 6*, 68.

[82] Park, J., & Brannon, E. M. (2013). Training the Approximate Number System Improves Math Proficiency. *Psychological Science*. (in press)

[83] Piazza, M., Pica, P., Izard, V., Spelke, E. S., & Dehaene, S. (2013). Education Enhances the Acuity of the Nonverbal Approximate Number System. *Psychological Science, 24* (6), 1037-1043.

[84] Dehaene, S., Bossini, S., & Giraux, P. (1993). The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology: General, 122* (3), 371-396.

[85] Cohen Kadosh, R., Lammertyn, J., & Izard, V. (2008). Are numbers special? An overview of chronometric, neuroimaging, developmental and comparative studies of magnitude representation. *Progress in Neurobiology, 84* (2), 132-147.

[86] Cappelletti, M., Freeman, E. D., & Cipolotti, L. (2009). Dissociations and interactions between time, numerosity and space processing. *Neuropsychologia, 47* (13), 2732-2748.

[87] Stavy, R., & Tirosh, D. (2000). How Students (Mis-) Understand Science, Mathematics: intuitive rules. New York, London, UK: Teachers College Press, Columbia University.

[88] Xuan, B., Zhang, D., He, S., & Chen, X. C. (2007). Larger stimuli are judged to last longer. *Journal of Vision, 7* (10), 1-5.

[89] Oliveri, M., Vicario, C. M., Salerno, S., Koch, G., Turriziani, P., Mangano, R., Chillemi, G. & Caltagirone, C. (2008). Perceiving numbers alters time perception. *Neuroscience Letters, 438* (3), 308-311.

[90] Rusconi, E., Kwan, B., Giordano, B. L., Umilta, C., & Butterworth, B. (2006). Spatial representation of pitch height: the SMARC effect. *Cognition, 99* (2), 113-129.

[91] Cohen Kadosh, R., & Henik, A. (2006). A common representation for semantic and physical properties: a cognitive-anatomical approach. *Experimental Psychology, 53* (2),

87-94.

[92] Pinel, P., Piazza, M., Le Bihan, D., & Dehaene, S. (2004). Distributed and Overlapping Cerebral Representations of Number, Size, and Luminance during Comparative Judgments. *Neuron, 41* (6), 983-993.

[93] Göbel, S. M., Johansen-Berg, H., Behrens, T., & Rushworth, M. F. (2004). Response-selection-related parietal activation during number comparison. *Journal of Cognitive Neuroscience, 16* (9), 1536-1551.

1 차원고접수 : 2013. 08. 30
2 차원고접수 : 2013. 09. 24
최종게재승인 : 2013. 09. 24

(*Abstract*)

A Review of the Neurocognitive Mechanisms of Number Sense

Soohyun Cho

Department of Psychology, Chung-Ang University

Human and animals are born with an intuitive ability to determine approximate numerosity. This ability is termed approximate number sense (hereafter, number sense). Evolutionarily, number sense is thought to be an essential ability for hunting, gathering and survival. According to previous research, children with mathematical learning disability have impaired number sense. On the other hand, individuals with more accurate number sense have higher mathematical achievement. These results support the hypothesis that number sense provides a basis for the development of mathematical cognition. Recently, researchers have been examining whether number sense training can lead to enhancement in mathematical achievement and changes in brain activity in relation to mathematical problem solving. Numerosity which basically represents discontinuous quantity is expected to be closely related to continuous quantity such as representations of space and time. A theory of magnitude (ATOM) states that processing of number, space and time is based on a common magnitude system in the posterior parietal cortex, especially the intraparietal sulcus. The present paper introduces current literature and future directions for the study of the common magnitude system.

Key words : Number, Quantity, Number Sense, Math Achievement, Weber Fraction, Space, Time, A Theory of Common Magnitude.