

보도자료



서울대학교
SEOUL NATIONAL UNIVERSITY

보도일시	2024. 11. 11.(월) 00:00부터 보도 가능
	국제엠바고를 준수하여 주시기 바랍니다
문의	연구단장/연구책임자 생명과학부 김 형 교수(02-880-4407) / 교신저자
	연구단/연구진 황성환 박사(02-880-4407) / 제1저자

제목	고등 인지 기능에 핵심인 '인지 유연성 담당 뇌 회로' 규명
부제	뇌 질환 행동 선택적 치료와 뇌 기반 컴퓨터 학습 모델 개발에 적용 가능한 병렬처리 뇌 회로 토대 제공

■ 요약

연구 필요성	인지적 유연성은 고등 동물에게 발달된 특징 중 하나로, 변화하는 다양한 환경에 적응하여 생존 가능성을 높여줌. 영장류에서 인지적 유연성이 어떤 뇌 회로를 통해 작동하는지 이해하는 것은 인간의 고등인지 행동을 설명하는 데 중요한 기반이 됨. 이를 통해 영장류 뇌를 기반으로 한 컴퓨터 학습 모델 개발과 뇌 질환 치료에 직접 적용할 수 있는 새로운 이론적 토대를 제공할 수 있음.
연구성과/기대효과	<p>1. 성과: 동물은 변화하는 환경에 적응하여 최적의 선택을 통해 생존을 도모함. 변화에 적응하는 능력인 인지 유연성(Cognitive flexibility)은 고등 동물에게 발달된 특징으로, 이를 통해 인간을 비롯한 영장류는 고등인지를 통해 생존에 유리한 위치를 차지할 수 있음. 본 연구에서는 인지 유연성을 제어하는 뇌의 심부 영역들을 발견하고, 이 영역들이 습관 고정성을 담당하는 뇌 심부 영역들과 분리되어 있음을 규명함. 더 나아가, 기존의 설치류 기반 연구에서 제시된 기존 직렬 학습과는 달리, 영장류의 뇌는 병렬 학습을 통해 인지 유연성을 확보한다는 새로운 뇌 회로 모델을 제시함.</p> <p>본 연구에서는 '가치 반전 학습 패러다임(Value reversal task)'을 사용하여 인지적 유연성을 제어하는 뇌 영역을 규명함. 이 실험에서 특정 프랙탈 이미지1을 선택하면 보상이 주어지고, 프랙탈 이미지2를 선택하면 보상이 주어지지 않으며, 이러한 프랙탈 이미지의 가치가 20~30번 반복 후 반전됨. 이를 통해 뇌 심부의 기저핵(basal ganglia) 영역에서 신경세포의 활성을 전기생리학적으로 측정된 결과, 선조체(striatum)의 조가비핵(putamen), 미상핵(caudate), 복부 선조체(ventral striatum) 앞부분의 넓은 영역이 인지적 유연성을 제어하는 데 기여함을 밝힘. 반</p>

	<p>대로 습관적 고정성은 선조체 세 영역의 뒷부분의 작은 영역에서 담당하는 것으로 확인됨.</p> <p>이 결과는 변화하는 환경을 지속적으로 모니터링하고, 이에 빠르게 적응하기 위해 많은 수의 신경세포가 선조체 앞부분에 할당되는 반면, 습관적인 행동을 유지하기 위해서는 선조체 뒷부분의 적은 수의 신경세포만이 할당된다는 점을 설명함. 더 나아가, 본 연구에서는 선조체의 세 영역이 외부 변화에 학습하는 시간을 측정된 결과, 기존 설치류 연구에서 제안된 ‘직렬 학습 모델’과 달리, 영장류 선조체의 세 영역은 학습 속도에서 차이가 없음을 최초로 밝힘. 이 결과는 영장류 선조체가 인지적 유연성을 위해 뇌의 더 넓은 영역을 확보하고, 외부 환경 변화에 빠르게 적응하기 위해 기저핵 세 영역을 동시에 사용한다는 ‘병렬 학습 모델’을 뒷받침하는 증거임.</p> <p>2. 기대효과:</p> <p>동물의 외부 변화 학습 모델은 컴퓨터 학습 모델에도 적용될 수 있음. 특히, 인간을 포함한 영장류의 뇌를 모사한 컴퓨터 학습 모델을 개발하는 데 본 연구에서 밝혀진 병렬 학습 모델이 중요한 기반이 될 것임. 또한, 영장류 선조체의 앞부분과 뒷부분이 각각 인지적 유연성과 습관적 고정성을 처리하는 뇌 회로에 대한 지식은 뇌 기초 연구뿐만 아니라, 뇌 질환 환자의 특정 행동 장애를 치료하는 데에도 실질적으로 활용될 수 있는 중요한 정보를 제공할 것임.</p>
Abstract	<p>Professor Hyoung F. Kim's research team in School of Biological Sciences at SNU has found that the rostral and caudal regions of the primate brain, including the caudate, putamen and ventral striatum, distinctively process cognitive flexibility and habitual stability, both at similar learning speeds, supporting a model of parallel value updating in the primate brain.</p> <p>The putamen is thought to generate habitual actions by processing value information relayed from the ventral striatum through the caudate nucleus. However, it is a question what value the putamen neurons process and whether the putamen receives serially processed value through the striatal structures. We found that neurons in the primate putamen, caudate, and ventral striatum selectively encoded flexibly updated values for adaptive behaviors with similar learning speeds, rather than stably sustained values for habit. In reversal value learning, rostral striatum neurons dynamically adjusted their responses to object values in alignment with changes in saccade reaction times following reversals. Notably, the value acquisition speeds within trials were similar, proposing a parallel value update in each striatal region. However, in stable value retrieval, most did not encode the values for habitual saccades. Our findings suggest that</p>

	the rostral striatum including the putamen is selectively involved in the parallel processing of cognitive flexibility.
Journal Link	https://authors.elsevier.com/a/1k04g_6s1aqvnN https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030100822400087X

■ 본문

- 인지 유연성(Cognitive Flexibility)은 고등 동물에게 발달된 특징으로, 변화하는 다양한 환경에 적응하여 생존 가능성을 높여줌.
- 영장류의 고등 인지행동을 설명하기 위해서 인지적 유연성이 어떤 뇌 회로를 통해 작동하는지 이해하는 것은 매우 중요함.
- 인지적 유연성 뇌 메커니즘 연구를 통해 인간에게 더 가까운 뇌 기반 컴퓨터 학습 모델 개발과 뇌 질환 환자 치료에 직접 적용할 수 있는 새로운 이론적 토대를 제공.
- 서울대 생명과학부 김형 교수 연구팀은 '가치 반전 학습 패러다임(Value Reversal Task)'을 사용하여 인지적 유연성을 제어하는 뇌 영역을 규명함.
- 이 패러다임에서 특정 프랙탈 이미지1을 선택하면 주스 보상이 주어지고, 프랙탈 이미지2를 선택하면 주스 보상이 주어지지 않으며, 이러한 프랙탈 이미지의 가치가 20~30번 반복 후 설명 없이 반전됨.
- 흥미롭게도 뇌 심부의 기저핵(basal ganglia) 영역에서 어떤 프랙탈 이미지가 나오던지 상관 없이 보상이 주어지는 프랙탈 물체와 그렇지 않은 프랙탈 물체를 모니터링하여 항상 구별하고 있는 '인지 유연성 인코딩 신경세포'가 발견됨.
- 이 인지 유연성 인코딩 신경세포는 선조체(striatum)의 조가비핵(putamen), 미상핵(caudate), 복부 선조체(ventral striatum) 앞부분의 넓은 영역에서 발견됨.
- 반대로 습관적 고정성은 선조체 세 영역의 뒷부분의 작은 영역에서 담당하는 것으로 확인됨.
- 따라서, 변화하는 환경을 지속적으로 모니터링하고, 이에 빠르게 적응하기 위해 많은 수의 신경세포가 선조체 앞부분에 할당되는 반면, 습관적인 행동을 유지하기 위해서는 선조체 뒷부분의 적은 수의 신경세포만이 할당된다는 점을 설명함.
- 이는 평상시 습관으로도 생존이 가능한 상황에서는 선조체 뒷부분의 간단한 뇌 회로를 작동하나, 환경에 변화하는 상황에 대비해서는 선조체 앞부분의 복잡한 뇌 회로를 작동시켜 효율적으로 뇌 리소스를 사용하여 정보를 처리하고 있음을 규명함.
- 더 나아가, 본 연구에서는 선조체의 세 영역이 외부 변화를 학습하는 시간을 측정하여 인지적 유연성을 획득하는 시간을 분석한 결과, 인지적 유연성 획득 시간이 각 선조체 영역마다 차이가 날 것이라고 예상한 기존 설치류 연구에서 제안된 '직렬 학습 모델'과 달리, 영장류 선조체의 세 영역은 학습 속도에서 차이가 없음을 최초로 밝힘.

○ 이 결과는 영장류 선조체가 인지적 유연성을 위해 뇌의 더 넓은 영역을 확보하고, 외부 환경 변화에 빠르게 적응하기 위해 기저핵 세 영역을 동시에 사용한다는 '병렬 학습 모델'을 뒷받침하는 증거임.

○ 또한, 본 연구를 통해 발견된 인지적 유연성을 제어하는 선조체 앞 부분 영역과 습관적 고정성을 제어하는 선조체 앞 부분 영역에 대한 이해를 통해 고등인지를 관여하는 영장류 뇌 회로에 대한 깊은 이해가 가능하며, 뇌 질환 환자들의 행동 이상 맞춤형 치료를 할 수 있는 발판을 마련함.

○ 더 나아가, 고등인지에 관여하는 병렬 학습 모델을 기반으로 영장류 뇌에 더 가까운 인공지능 개발에 사용될 수 있는 새로운 지식 패러다임을 제공함.

○ 이번 연구는 김형 교수의 총괄 아래 황성환 박사와 안신영 석사의 주도로 중견연구자지원사업과 뇌질환극복사업, 글로벌-LAMP프로그램 등의 지원을 받아 국제신경생물학 학술지인 '프로그레스 인 뉴로바이올로지(*Progress in Neurobiology*)'에 2024년 10월자로 온라인에 게재되었다.

□ 연구결과

The primate putamen processes cognitive flexibility alongside the caudate and ventral striatum with similar speeds of updating values

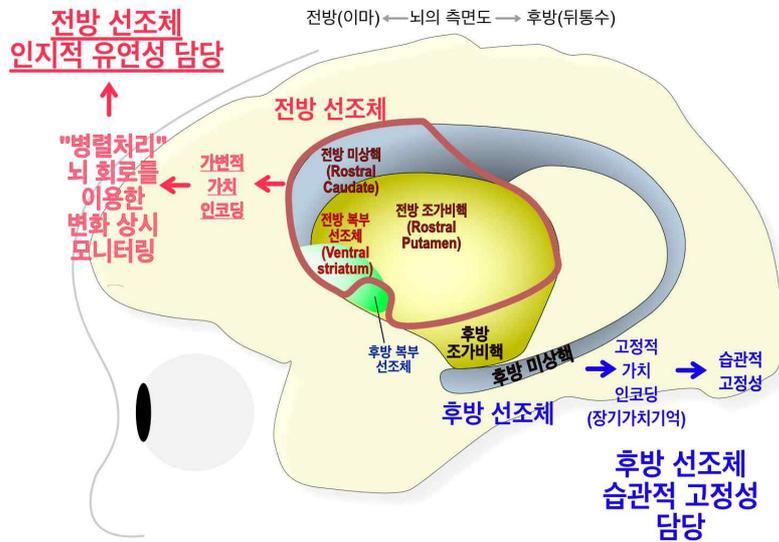
안신영, 황성환, 이건우, 김형

(*Progress in Neurobiology, in press*)

인지적 유연성(Cognitive Flexibility)은 고등 동물에게 발달된 중요한 특징으로, 변화하는 환경에 적응함으로써 생존 가능성을 높임. 영장류의 고차원적 인지 행동을 설명하기 위해 인지적 유연성이 어떤 뇌 회로를 통해 작동하는지 이해하는 것은 매우 중요함. 본 연구에서는 '가치 반전 학습 패러다임(Value Reversal Task)'을 사용하여 인지적 유연성을 제어하는 뇌 영역을 규명함. 특히 흥미로운 발견은 기저핵(basal ganglia) 영역에서 인지 유연성을 인코딩하는 신경세포들이 프렉탈 이미지의 가치 여부와 상관없이, 변화하는 보상 구조를 끊임없이 모니터링하며 구별하는 역할을 한다는 사실임. 이러한 인지 유연성 인코딩 신경세포는 선조체(striatum)의 조가비핵(putamen), 미상핵(caudate), 복부 선조체(ventral striatum) 앞부분의 넓은 영역에서 발견되었음. 반대로, 습관적 고정성은 선조체 세 영역의 뒷부분의 작은 영역에서 담당하는 것으로 확인됨. 이는 변화하는 환경에 빠르게 적응하기 위해 많은 신경세포가 선조체 앞부분에 할당되고, 반면 습관적인 행동을 유지하기 위해서는 선조체 뒷부분의 적은 신경세포가 할당된다는 점을 시사함. 또한, 본 연구에서는 선조체의 세 영역이 외부 변화에 대한 학습을 어떻게 처리하는지 분석한 결과, 선조체 세 영역이 차례대로 학습에 관여하여 학습 속도에 차이가 날 것이라는 기존 설치류

연구의 '직렬 학습 모델'과는 달리, 영장류에서는 세 영역 모두 학습 속도에서 차이가 없다는 사실을 세계 최초로 밝힘. 이는 영장류 선조체가 인지적 유연성을 확보하기 위해 더 넓은 뇌 영역을 사용하고, 기저핵의 세 영역을 동시에 활용하는 '병렬 학습 모델'을 지지하는 결과임. 이 연구를 통해, 인지적 유연성을 제어하는 선조체 앞부분 영역과 습관적 고정성을 제어하는 선조체 뒷부분 영역에 대한 깊은 이해를 얻게 되었으며, 이는 고등 인지를 관장하는 영장류 뇌 회로에 대한 새로운 통찰을 제공함. 더 나아가, 인지적 유연성과 습관적 고정성을 관장하는 분리된 뇌 회로의 발견은 뇌 질환 환자들의 서로 다른 행동 이상을 맞춤형으로 치료할 수 있는 중요한 기초 지식이 될 것이며, 병렬 학습 모델을 기반으로 영장류 뇌와 더 유사한 인공지능 개발에 필요한 새로운 지식 패러다임을 제공할 것임.

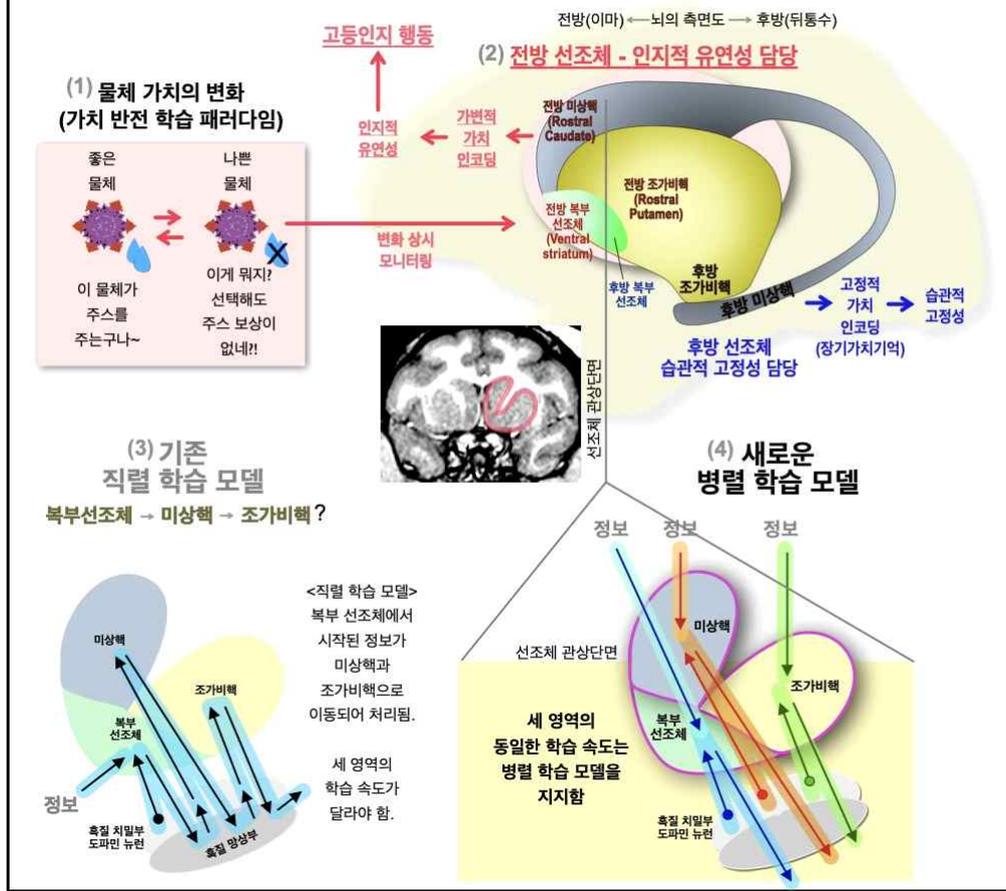
□ 그림설명



(그림 1) 인지적 유연성을 선택적으로 병렬 처리하는 뇌 심부 회로 규명:

선조체를 구성하는 미상핵(caudate), 조가비핵(putamen), 그리고 복부 선조체(ventral striatum)의 전방(이마쪽) 영역은 외부 변화를 상시 모니터링해서 빠른 적응을 하는 인지적 유연성을 담당하고 있다. 반대로 후방(뒤통수쪽) 선조체 영역들은 오랜 경험에 의해 효율적이고 자동적인 행동을 수행하게 하는 습관적 고정성을 담당한다. 전방 선조체의 세 영역은 각각 병렬회로를 통해 서로 독립적으로 외부 변화를 빠르게 인지하여 어떤 상황에도 유연하게 대처하도록 한다.

인지적 유연성과 습관적 고정성을 담당하는 분리된 뇌 회로 규명



(그림 2 - 상세 그림) 인지적 유연성을 선택적으로 처리하는 뇌 심부 회로 규명:

외부 환경 변화를 지속적으로 모니터링하는 것은 생존에 유리한 조건을 조성하고, 고차원적인 인지 행동의 기반이 됨. 본 연구에서는 영장류의 뇌 심부에 위치한 전방 선조체 영역이 시각적 자극인 프랙탈의 가치 변화를 모니터링하며, 이를 통해 의사결정의 핵심 정보를 처리하고 있음을 규명했음. 프랙탈 물체와 주스 보상의 연합이 변화하는 ‘가치 반전 학습 패러다임’에서 하나의 프랙탈 물체를 선택하면 약 20~30번 정도 보상이 주어지다 더 이상 제공되지 않음(왼쪽 위 그림(1)). 그러나 영장류는 이 변화를 빠르게 인지하고, 보상이 주어지는 다른 프랙탈 물체를 찾아 낼 수 있었음. 전기생리학적 분석을 통해 미상핵, 조가비핵, 복부 선조체의 전방 영역이 이러한 변화를 지속적으로 모니터링하고 있음을 발견했음(오른쪽 위 그림(2)). 또한, 인지적 유연성에 관여하는 전방 선조체 영역은 습관적 고정성을 담당하는 후방 선조체 영역과 분리되어 있음을 밝혔음(오른쪽 위 그림(2)). 흥미롭게도 선조체의 세 영역이 물체의 가치 변화를 학습하는 데 걸리는 시간을 측정 한 결과, 세 영역 모두 동일한 속도로 학습한다는 사실을 확인함. 이는 기존 설치류 연구에서 제안한, 복부 선조체에서 학습된 정보가 조가비핵으로 이동하면서 각 영역의 학습 속도가 다를 것이라는 직렬 학습 모델(왼쪽 아래 그림(3))과는 상반된 결과임. 대신, 영장류에서 세 선조체 영역이 동시에 환경 변화를 학습하는 ‘병렬 학습 모델’을 지지하는 결과를 제시함(오

른쪽 아래 그림(4)). 이 연구를 통해 영장류 뇌의 전방 선조체가 인지적 유연성을 처리하며, 이는 후방 선조체에서 습관적 고정성을 처리하는 영역과 명확히 분리되어 있음을 규명했음.

*참고자료(인지 유연성과 습관적 고정성에 대해서):

<https://contents.premium.naver.com/jiphyunnet/knowledge/contents/240826205037884og>