

브레인모픽 시뮬레이터 연구 동향

Research Trends in Brain-Morphic Simulators

김성환 (S.H. Kim, seonghwan.kim@etri.re.kr)	사이버브레인연구실 선임연구원
우영춘 (Y.C. Woo, ycwoo@etri.re.kr)	사이버브레인연구실 전문연구위원
원희선 (H.S. Won, hswon@etri.re.kr)	사이버브레인연구실 책임연구원/실장
길명선 (M.S. Gil, gils@kangwon.ac.kr)	강원대학교 컴퓨터공학과 선임연구원
문양세 (Y.S. Moon, ysmoon@kangwon.ac.kr)	강원대학교 컴퓨터공학과 교수

ABSTRACT

The human brain, containing approximately 86 billion neurons and 100 trillion synapses, is a highly complex organ that governs intelligence and cognition. While traditional neuroscientific approaches offer significant insights, they face limitations in fully understanding the intricate dynamics of the brain. To address these challenges, brain-morphic simulators have emerged as promising tools that utilize high-performance computing and big data to replicate the brain's structure and function. These simulators offer new opportunities for testing hypotheses, studying brain disorders, and advancing artificial intelligence by providing precise models of brain mechanisms. This paper presents a comprehensive review of the development and current trends in brain-morphic simulators, analyzing major projects such as the Blue Brain Project and the Human Brain Project. Additionally, we explore the technical challenges faced by these simulators and their potential in transforming neuroscience and related fields. By providing a detailed understanding of these technologies, this study aims to highlight their significance and future directions in brain research.

KEYWORDS Brain-morphic simulation, Neuroinformatics, Neuroscience

1. 서론

인간의 뇌는 약 860억 개의 뉴런과 이와 유사한 수의 신경아교세포(Glia)를 포함하며, 100조 개 이상의 시냅스로 이루어진 극도로 복잡한 기관이다. 인간 지성의 근원으로 여겨지는 뇌를 이해하기 위한

연구는 수백 년에 걸쳐 발전해왔으며, 철학적, 실험적, 이론적 접근을 거쳐 현재에 이르렀다[1,2].

뇌 연구는 초기의 철학적 고찰에서 시작하여 실험적 신경과학을 거쳐 이론 신경과학으로 발전해왔다. 그러나 뇌의 복잡성과 창발적 특성으로(Emergent Property) 인해 기존의 접근 방식만으로는 뇌의 전체

* DOI: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2024.J.390606>

* 본 연구는 한국전자통신연구원 연구운영비지원사업의 일환으로 수행되었음[24BB1210, 해마 기능 탐색을 위한 생물학적 신경회로 시뮬레이터 및 유효성 검증 방법 연구 / 24ZB1330, 브레인모픽 디코더-인코더 원천기술 연구개발].



적 작동 원리를 완전히 이해하는 데 한계가 있었다. 또한, 뇌의 다양한 계층에서 얻은 방대한 데이터를 해석하고 분석하는 데 어려움이 있었다. 이러한 한계를 극복하고자 최근에는 컴퓨터 시뮬레이션을 활용한 새로운 접근 방식이 등장하였다.

브레인모픽 시뮬레이터는 뇌의 구조와 기능을 컴퓨터 모델로 정밀하게 재현하려는 시도로, 데이터 기반 모델링(Data-Driven Modeling)과 고성능 컴퓨팅(HPC) 기술을 활용하여 뇌의 복잡한 메커니즘을 이해하고 새로운 가설을 검증하는 데 기여하고 있다. 또한, 향후 뇌질환 연구 및 치료, 차세대 인공지능 개발 등 다양한 목적으로 활용될 수 있다. 이는 뇌 연구의 새로운 패러다임을 제시하며, 뇌의 작동 원리에 대한 더 깊은 이해를 가능하게 할 것으로 기대된다.

본 연구에서는 브레인모픽 시뮬레이터의 개념 및 발전 과정과 선진국 주요 프로젝트, 현재 기술 동향과 제약, 그리고 미래 전망을 포괄적으로 분석하여 이 기술이 뇌 연구에 미치는 영향과 가능성을 탐구하고자 한다. 이를 통해 뇌 연구의 새로운 방향성을 확인하고, 향후 뇌과학 발전에 기여할 수 있는 통찰을 얻고자 한다.

II. 계산신경과학과 브레인모픽 시뮬레이터의 연구 배경

1. 뇌 연구의 역사적 발전

가. 철학적 연구에서 실험적 신경과학으로의 전환

뇌 연구는 초기에 철학적 고찰에 의존했으나, 실증적 기반이 부족했다. 19세기 말, 실험적 신경과학의 발전으로 연구 패러다임이 변화하여 뇌 연구의 과학적 기초를 마련했다. 특히나 골지 염색법의 발명은 뇌의 세포 구조를 명확히 관찰할 수 있게 하여,

뉴런이라는 뇌의 기본 단위를 확인하는 데 결정적 역할을 했다[3].

나. 호지킨-헉슬리 모델과 환원주의적 접근의 한계

20세기 중반, 호지킨-헉슬리(Hodgkin-Huxley) 모델은 뉴런의 전기적 활동을 수학적으로 설명하며 신경과학 발전의 중요한 전환점이 되었다[4]. 이는 뉴런의 전기적 활동을 정량적으로 분석할 수 있는 기반을 마련하여, 전기적 신호 전달 과정을 이해할 수 있게 되었다. 이후 신경과학 연구는 점차 환원주의적 접근을 취하게 되었다. 이는 복잡한 시스템을 그 구성 요소로 분해하여 이해하려는 방법론이다. 개별 뉴런 분석과 다차원 세포 유형 분류를 통해 특성과 기능의 이해를 높였으며, 예를 들어 시각 피질 연구는 개별 뉴런이 기능적으로 특정 시각 자극-특정 방향의 선이나 가장자리-에 선택적으로 반응한다는 것을 보여주었다[5].

그러나 환원주의적 접근의 한계점으로 의식, 기억, 학습과 같은 고차원적 인지 기능은 개별 뉴런의 활동만으로는 설명하기 어렵다는 견해가 지배적이다. 즉, 뇌가 단순한 구성 요소의 합 이상의 복잡한 시스템이라는 인식이 확립되었다.

다. 이론 신경과학과 창발적 특성의 부각

20세기 후반, 실험적 접근의 한계를 극복하기 위해 이론 신경과학이 발전했다. 이는 거시적 실험 데이터를 바탕으로 추상화, 단순화를 통해 수학적 모델을 구축하고, 이를 통해 뇌의 작동 원리를 설명하려는 시도였다[6]. 뇌의 다양한 영역 간 상호작용을 모델링하여 뇌의 영역별 기능 탐색과 신경활동 경로(Pathways)를 찾는 연구들이 있다[7]. 이론 신경과학의 주요 목표 중 하나는 뇌의 창발적 특성(Emergent Property)을 이해하는 것이었다. 창발적 특성이란 복

잡계 이론에서도 다뤄지는 성질로 개별 구성 요소의 특성만으로는 예측할 수 없는, 시스템 수준에서 나타나는 새로운 특성을 말한다. 예를 들어, 의식이 나 인지 기능은 개별 뉴런의 특성만으로는 설명할 수 없는 창발적 특성으로 여겨진다[8].

연구자들은 뉴런의 복잡한 분자적 과정을 단순화하고, 전기 신호와 발화 패턴에 집중하였으며, 복잡한 시스템이나 거시적 기작 등을 단순화함으로써 뇌의 복잡성을 이해하려 하였다[9].

2. 브레인모픽 시뮬레이터의 등장 배경

가. 이론 신경과학의 한계와 통합적 접근의 필요성

그러나 이론 신경과학 역시 한계에 직면했다. 수학적 모델링을 위해 많은 부분을 단순화하다 보니, 실제 생물학적 뇌의 복잡성을 충분히 반영하지 못하였으며, 모델의 예측과 실제 뇌의 작동 사이에 괴리가 발생하는 경우도 있었다.

이러한 한계를 극복하기 위한 새로운 시도로, 2005년 스위스 로잔 연방 공과대학의 헨리 마크람이 주도한 Blue Brain Project가 있다. 이 프로젝트는 뇌를 단순히 뉴런의 집합체가 아닌, 다차원적 네트워크로 바라보았다. 유전자, 단백질, 세포, 시냅스, 뇌 영역 등 다양한 수준의 요소가 복잡하게 상호작용한다는 관점에서 접근한 것이다[2]. 또한, 하위 레벨의 메커니즘을 포함하는 것이 뇌 기능을 정확하게 해석하는 데 필수적임을 강조했다. 이는 특정 생리/병리적 과정을 거시적 스케일에서 모델링할 수 있더라도, 분자적 스케일의 미시적 해상도가 부족하면 기계적 통찰을 얻기 어렵다는 연구 결과와 일맥상통한다[10].

더불어, 최근 연구들은 기존 단순화 모델에서 간과된 요소들의 중요성을 강조한다. 예를 들어, 전체

뇌세포의 약 50%를 차지하는 신경아교세포는 단순 지지세포가 아닌 정보 처리에 직접 이바지한다는 사실[11-13]과 호르몬 대사(Hormone Metabolism)가 신경 가소성(Plasticity)에 영향을 미친다는 발견[14]은 뇌의 다양한 요소 간의 상호작용과 인과관계에 대한 이해가 필요함을 시사한다.

뇌의 정확한 작동 원리는 아직도 완전히 밝혀지지 않았기 때문에, 이론 신경과학의 모델은 그 자체로 불완전할 수밖에 없다. 이론과 실험의 상호보완적 접근이 필요하며[9], 이를 통해 보다 현실에 가까운 뇌의 모델을 구축할 수 있다.

나. 시뮬레이션 신경과학의 발전과 향후 전망

2010년대에 들어서면서 컴퓨팅 기술의 발전과 함께 시뮬레이션 신경과학이 급속도로 발전하기 시작했다. 이는 대규모 뇌 데이터를 통합적으로 분석하고, 복잡한 상호작용을 시뮬레이션할 수 있는 가능성을 열어주었다.

대표적인 예로 2013년에 시작된 EU의 Human Brain Project는 뉴로모픽 칩을 탑재한 HPC 시스템을 구축하여 다양한 수준에서의 인간 뇌 모델을 구축하고, 뇌의 복잡한 상호작용을 시뮬레이션하는 것을 목표로 다양한 신경과학적 가설을 검증하려 시도하였다. 뇌의 구조와 기능을 최대한 정확하게 모방하려는 브레인모픽 시뮬레이션을 통해서 기능적 모방을 넘어서, 생물학적 구조와 작동 원리를 충실히 재현하려하고 있다[15]. 고성능 컴퓨팅, 빅데이터 분석, 인공지능 등 최신 기술을 결합하여 뇌의 복잡성을 더욱 정밀하게 분석하고 모델링하고 있다. 이를 통해 뇌 연구는 실험적 데이터에만 의존하던 단계를 넘어, 시뮬레이션을 통한 예측과 검증 가능한 새로운 패러다임으로 전환되고 있다.

그러나 이러한 발전에도 불구하고, 여전히 많은 도전 과제가 남아있다. 뇌의 모든 복잡성을 완벽하

게 시뮬레이션하는 것은 현재의 기술로는 불가능하며, 시뮬레이션 결과를 실제 뇌의 작동과 어떻게 연관 지을 것인지에 대한 문제도 남아있다[16]. 또한, 윤리적 문제와 데이터 보안 문제 등도 고려해야 할 중요한 사항이다.

III. 브레인모픽 시뮬레이터의 개념과 필요성

1. 브레인모픽 시뮬레이션의 개념

브레인모픽 시뮬레이션(Brain-Morphic Simulation)은 뇌의 복잡한 구조와 기능을 생물학적으로 정밀하게 재현하기 위한 특화된 시뮬레이션 기법으로, 본 고에서는 뇌 시뮬레이션의 하위 개념으로 규정한다. ‘모픽(Morphic)’이라는 용어가 시사하듯, 이 기술은 단순히 기능을 모방하는 수준을 넘어 뉴런-시냅스의 미세한 수준에서 뇌의 신경 구조와 동역학을 고해상도로 재현하는 데 중점을 둔다. 구체적으로는, 해부학적 연결성, 뉴런 간 상호작용, 시공간적 동역학, 생리적·화학적 과정을 생물학적 타당하게(Biologically Plausible) 모델링함으로써 정보 처리, 학습, 기억, 의사결정과 같은 고차원적 뇌 기능을 심층적으로 이해하고자 한다.

브레인모픽 시뮬레이션의 핵심은 다수준(Multi-Scale) 상호작용을 포괄하는 모델링에 있다. 아(亞)뉴런, 뉴런-시냅스, 신경 회로, 뇌 영역, 전뇌와 같은 다양한 수준에서 발생하는 복잡한 상호작용을 통합적으로 다루며, 각 수준의 신호 전달과 정보 처리가 어떻게 고차원적 뇌 기능으로 연결되는지를 인과적으로 규명하고자 한다[8].

브레인모픽 시뮬레이션은 신경과학적 가설을 검증하고, 뇌 질환의 원인을 분석하며, 뇌 영감(Brain-Inspired) 인공지능 개발에 응용되는 광범위한 활용 분야를 포함한다. 특히, 뇌의 작동 원리를 규명

함으로써 뇌의 정보 처리 방식을 이해하고, 이를 바탕으로 한 혁신적인 차세대 컴퓨팅 패러다임을 제시하고자 한다.

2. 기존 뇌 연구 방법의 한계와 새로운 접근법의 필요성

뇌의 다양한 신경 활동 연구 방법들은 각각 장단점이 있으며, 이를 보완하기 위해 *in silico* 모델의 필요성이 대두되고 있다[17].

in vivo 모델은 생체 내에서 뇌의 기능을 직접 연구함으로써 가장 현실적인 결과를 제공한다. 그러나 윤리적 문제로 인한 인간 대상 실험에 제약이 따르며, 뇌 심부 구조 접근 시 비가역적 손상 가능성이 있고, 대규모 신경 활동을 동시 고해상도로 기록하는 데 한계가 있다. *in vitro* 모델은 뇌세포를 평판 위에 고밀도로 배양하여 조직화하는 방식으로, 비용 효율성과 높은 재현성 덕분에 널리 사용되며, 특정 신경세포나 회로의 기능을 상세히 연구할 수 있다. 그러나 복잡한 3차원 구조나 영역 레벨의 상호작용을 재현하기에는 한계가 있다. 최근에는 오가노이드 연구를 통해 이러한 한계를 극복하려는 시도가 이루어지고 있다[18]. *ex vivo* 모델은 뇌 조직을 분리하여 연구하므로 실제 조직의 특성을 유지하고 더 나은 실험 제어를 할 수 있지만, 조직 분리 과정에서 자연적 신경 연결이 파괴되고, 생존 시간이 제한적인 한계가 있다.

이러한 한계를 극복하기 위한 *in silico* 모델인 브레인모픽 시뮬레이터는 실험 데이터를 바탕으로 뇌의 구조와 기능을 컴퓨터 모델로 구현하여, 대규모, 장기간의 신경 활동 시뮬레이션을 윤리적 제약 없이 다양한 조건에서 반복적으로 가능하게 한다[17]. 다만, 브레인모픽 시뮬레이터의 결과는 항상 실제 생물학적 시스템과의 비교 검증이 필요하다. 시뮬레

이션을 통해 생성된 가설과 예측은 다시 전통적인 실험 방법을 통해 검증되어야 하며, 이 과정에서 얻은 새로운 데이터는 시뮬레이션 모델을 더욱 정교화하는 데 사용된다[16]. 브레인모픽 시뮬레이터는 기존의 연구 방법들과 긴밀히 연계된 통합적 접근법의 핵심 요소로 볼 수 있다.

3. 인접 연구 분야와의 관계

뉴로모픽 컴퓨팅(Neuromorphic Computing)과 뇌 영감 컴퓨팅(Brain-Inspired Computing)은 뇌의 구조와 기능을 모방하는 기술이라는 관점에서 브레인모픽 시뮬레이션과 밀접하게 관련된다. 이 세 가지 접근법은 모두 뇌의 작동 원리를 컴퓨팅 시스템에 적용하려는 시도이며, 때로는 동일한 시스템 모델을 공유하기도 한다.

뉴로모픽 컴퓨팅과 뇌 영감 컴퓨팅은 종종 동일한 연구 분야로 설명되기도 한다[19,20]. 두 기술 모두 뉴런과 시냅스의 활동을 모델링하여 인간 지능을 모사하거나, 이를 바탕으로 효율적인 계산 시스템을 개발하는 것을 목표로 한다.

그러나 연구의 목적과 방향성에 따라 뉴로모픽 컴퓨팅과 뇌 영감 컴퓨팅은 다르게 구분되기도 한다[21]. 뉴로모픽 컴퓨팅은 하드웨어 중심의 접근법으로, 생물학적 뉴런의 전기화학적 특성을 실리콘 기반으로 구현한다. 약 20W의 에너지만으로 복잡한 인지 기능을 수행하는 인간 뇌의 연산 구조를 하드웨어로 재현하려는 시도이며, 특히 스파이킹 뉴런 네트워크를 물리적으로 구현하여 뇌의 병렬 처리 능력을 달성하고자 한다[22].

뇌 영감 컴퓨팅은 생물학적 뇌의 정보 처리 메커니즘을 알고리즘 수준에서 모델링한다. 시각 처리 네트워크, 주의 집중, 생물학적으로 타당한 학습, 강화학습 등 뇌의 다양한 기능적 특성을 컴퓨팅 시

스템에 적용하는 것을 목표로 한다[21-26]. 특히 중요한 신경과학적 현상, 모티프(Motif), 패턴, 특정 신경 회로(Pathways)의 정보 처리 작동 방식을 모방하는 접근을 포함한다.

이들 세 분야는 서로 다른 목표와 접근 방식을 가지고 있으나, 연구 과정에서 상호 보완적 관계를 형성한다. 브레인모픽 시뮬레이션은 수백만 개의 뉴런과 시냅스로 구성된 대규모 신경망을 시뮬레이션하기 위해 뉴로모픽 하드웨어의 고성능 병렬 처리 능력을 활용한다. 이는 특히 실시간 신경 동역학 시뮬레이션과 복잡한 신경회로 모델링에서 큰 이점을 제공한다[27,28].

반면, 뇌 영감 컴퓨팅은 신경과학적 원리를 추상화·단순화한 이론 모델을 제공함으로써, 브레인모픽 시뮬레이션 결과가 상위 수준의 인지 기능을 정확하게 설명하는지 검증하는 프레임워크를 제공한다. 이는 시뮬레이션 모델의 생물학적 타당성을 평가하고 개선하는 데 핵심적인 역할을 한다. 한편, 브레인모픽 시뮬레이션은 뇌의 구조적, 기능적 패턴들을 발견하여 뇌 영감 컴퓨팅의 알고리즘 개발에 중요한 통찰을 제공한다. 해마의 기억 형성 메커니즘 시뮬레이션에서 발견된 신경회로 패턴은 새로운 메모리 네트워크 설계의 기반이 되며, 시각 피질의 정보 처리 구조 분석은 효율적인 시각 인식 알고리즘 개발로 이어진다[24,25,29].

IV. 해외 주요 프로젝트

1. 미국 BRAIN Initiative

BRAIN(Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies) Initiative는 2013년 4월에 발표된 미국의 대규모 연구 프로젝트로, 인간 뇌 기능을 심층적 분석하기 위한 기술 개발을 목표로 한다[30]. 본 프로젝트는 NIH(National Institutes of Health)를

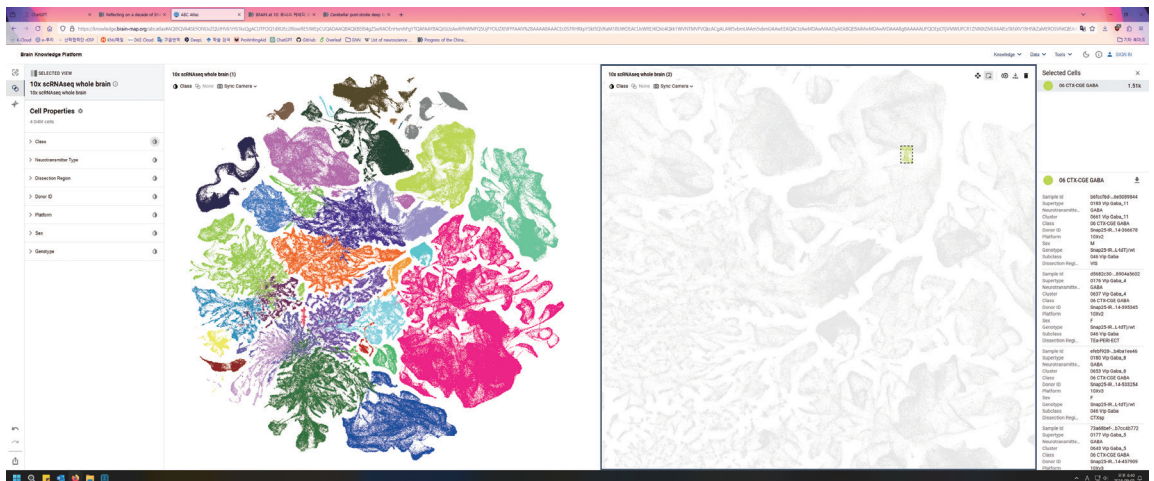
표 1 해외 브레인 프로젝트 비교

구분	BRAIN Initiative	Human Brain Project	Blue Brain Project	China Brain Project
출범 연도	2013	2013	2005	2016
주도 국가(기관)	미국(미국 국립보건원 및 관련 연구소/학교)	EU(EU 내 의료보건 관련 기관)	스위스(EPFL, 스위스 연방 공과대학교)	중국(중국 정부 및 중국 과학원)
목표	뇌의 활동을 세밀하게 관찰하여 뇌질환 치료를 위한 도구 개발	뇌의 디지털화 및 시뮬레이션을 통한 뇌 기능 이해, 신경과학 데이터 통합	뇌 회로 시뮬레이션 기반 인간 뇌의 작동 원리 이해	인간 인지 기능, 뇌질환 연구 및 뇌-기계 인터페이스 개발
대상 뇌 종류	인간, 쥐, 원숭이, 초파리 등 여러 동물 모델	인간 뇌 및 일부 동물 데이터 사용	쥐의 뇌	인간, 원숭이 및 기타 동물 모델
연구 방식	뇌 분석 모델 및 도구 개발 (뇌 신호 기록, 뉴런 연결 분석 등)	슈퍼컴퓨팅 기반 뇌 시뮬레이션 및 데이터 통합	뇌 신경망 시뮬레이션 기반 생물학적 뇌 구조/기능 이해	뇌질환 연구, 인공지능 및 신경망 결합
연구 영역	뉴런 간 연결망 분석, 뇌 신호 탐지 기술 개발	뇌 시뮬레이션 및 모형화, 신경과학 데이터 구축	뇌의 전자적 시뮬레이션, 뉴런 간 상호작용 연구	뇌질환, 뇌-컴퓨터 인터페이스, 인공지능 연관 연구
주요 성과	뇌 스캐닝 기술 혁신, 뉴런 및 회로 이해 증가	뇌 모형화 및 데이터 공유 플랫폼 구축	쥐의 뇌 일부 동작 메커니즘 시뮬레이션	뇌 질환에 이해 증진, 뇌-기계 인터페이스 개발

중심으로 NSF(National Science Foundation), DARFA (Defense Advanced Research Projects Agency) 등의 미국 핵심 기관들의 주도하에 민간단체 및 학교들과 연구를 진행 중이며, 특히, 뇌질환 치료를 위한 뇌 신경 회로의 작동 메커니즘을 밝히는 데 주력하고 있다.

BRAIN Initiative에서는 인간 신경과학, 시스템 신경과학 등 뇌 구조 분석 및 임상 연구뿐만 아니라 프로젝트의 윤리적, 사회적 영향력 분석을 연구하는

신경윤리학, 연구인력 양성 등 포괄적인 연구 분야를 지원한다. 특히, 기존 뇌의 세포, 회로, 지도, 동작 등 구분되어 있던 여러 개별 연구를 하나의 과학 분야로 통합하기 위해, 각 분야의 연구 결과를 유기적으로 연결하려는 노력을 하고 있다. 이를 위해, BRAIN Initiative는 “도구 중심(Tool-driven)의 혁명”이라는 목표하에 신경과학계에서 연구 자원과 도구를 저렴하게 이용할 수 있도록 개방형 프로젝트를



출처 Seattle Alzheimer's Disease Brain Cell Atlas, <https://portal.brain-map.org/explore/seattle-alzheimers-disease>

그림 1 Seattle Alzheimer's Disease Brain Cell Atlas(SEA-AD)의 뇌세포 아틀라스 도구

운영한다. 결과적으로, 알코올 중독과 남용에 따른 뇌세포 변화 및 신경 신호의 실시간 탐지, 뇌 내 연결의 전체 집합인 커넥톰(Connectome) 분석을 통한 뇌졸중 환자의 운동성 개선[31], 오픈소스 멀티모달 아틀라스 개발 프로젝트[32-35](그림 1) 등을 통한 알츠하이머 뇌세포 유형 및 동작 회로 발견에 크게 이바지했다.

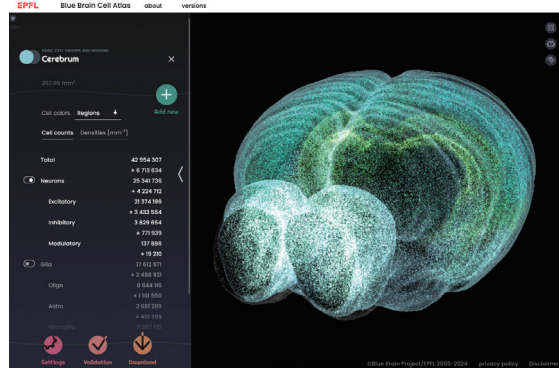
2. EU Human Brain Project와 EBRAINS

EU에서 진행한 HBP(Human Brain Project)[36]는 2013년부터 2023년까지 총 10년간 진행된 10억 유로 규모의 프로젝트로, 엑사스케일 규모의 슈퍼컴퓨터를 기반으로 신경과학 및 뇌과학 분야의 연구 인프라 구축을 진행했다. 실제 Bio-inspired 연산을 지원할 수 있는 고성능 ICT 컴퓨팅 환경 구성을 위해 12개의 하위 프로젝트(HW/SW 관련 6개, 신경과학 데이터 구축 관련 4개, 신경과학 윤리 1개, 프로젝트 관리 1개)를 구성하고, HBP 종료 후 EBRAINS[37]라는 후속 프로젝트를 운영 중이다.

EBRAINS는 신경과학, 특히 뇌과학을 위한 다양한 디지털 인프라 제공을 목표로 한다. 데이터셋, 뇌 아틀라스, 모델링/시뮬레이션/컴퓨팅 도구, 평가/추론 도구, 건강 특화 연구 플랫폼 등을 제공한다. 특히, 연산량이 매우 많은 기존 신경과학 분야에서 활용 가능한 시뮬레이션 및 컴퓨팅 도구들을 공유하여 새로운 뇌 데이터 수집 및 아틀라스 작성에 큰 성과를 보였다.

3. 스위스 Blue Brain Project

Blue Brain Project는 2005년 스위스 로잔 연방 공과대학(EPFL: Ecole Polytechnique Federale de Lausanne) 주도하에 진행된 쥐의 뇌 지도 구축 프로젝트이다



출처 T.E. Feinberg and J. Mallatt, "Phenomenal Consciousness and Emergence: Eliminating the Explanatory Gap," *Front. Psychol.* 11, 2020, CC BY. doi: 10.3389/fpsyg.2020.01041

그림 2 Blue Brain 세포 아틀라스 예시

[38]. Blue Brain Project에서는 쥐의 뇌 지도와 동작 분석을 통해 포유류의 뇌 구조를 이해하고자 했다. IBM Blue Gene 슈퍼컴퓨터를 활용한 뇌 지도 제작을 진행했으며, 뉴런 단위 시뮬레이션이 가능한 NEURON[39]을 구동하여 완성하였다.

그 결과, 그림 2와 같이 쥐의 전체 뇌 조직과 인간의 뇌 조직 일부를 반자동으로 구성할 수 있는 알고리즘을 구축했다. 그리고, 해당 기술을 기반으로 인간의 뇌 조직도 구성할 수 있는 포유류 뇌에서 신경회로의 연결 구조와 생물학적 동작 메커니즘을 재현하고, 시뮬레이션을 통해 실제 신경회로 수준의 활동 패턴을 파악할 수 있게 되었다. 또한, 프로젝트 커뮤니티에서 확보한 뇌 이미지/영상, 뉴런 및 세포 관련 실험 데이터, 모델링/시뮬레이션 데이터 등 대량의 신경과학 관련 오픈 데이터셋을 구축·지원하고 있다.

4. 중국 China Brain Project

China Brain Project는 2016년 중국 정부와 중국과학원(CAS: Chinese Academy of Sciences) 중심으로 시작된 프로젝트로, 2021년에 와서야 활발히 진행되기

시작했다. China Brain Project는 1) 인지 기능을 담당하는 신경 분석, 2) 뇌 장애 진단 및 치료, 3) 뇌 메커니즘과 컴퓨팅의 접목이라는 세 가지 영역에 중점을 둔다. 원숭이를 대상으로 뇌 지도 구성을 위한 데이터를 구축하고 있으며, 활성화된 뉴런의 뇌 3D 이미지로부터 신경을 매핑, 추출하는 기술을 사용해 뇌세포와 신경 단위 데이터를 구축한다.

BrainCog(Brain-inspired Cognitive Intelligence Engine) [40]는 China Brain Project로부터 영향을 받아 중국 과학원이 주도한 인지 지능 엔진 개발 프로젝트이다. 그림 3은 BrainCog의 전체 구조도를 나타낸다. 뇌 기능 중에서도 인지 기능(오감, 신체 기관의 반응 및 동작 등)의 모사를 가장 큰 목표로 하고 있다. 이는 향후 인공 일반 지능(AGI: Artificial General Intelligence) 분야를 선점하기 위함이다. 특히, BrainCog는 뉴런, 신경회로 등에서 얻은 인지 데이터와 SNN(Spiking Neural Network)를 연계하여 고수준 의사결정

과 함께 행동이 가능한 인공지능 기술을 확보하기 위해 쥐, 원숭이, 인간의 뇌로부터 스파이크 뉴런을 시뮬레이션한 모델들을 오픈소스로 공개했다.

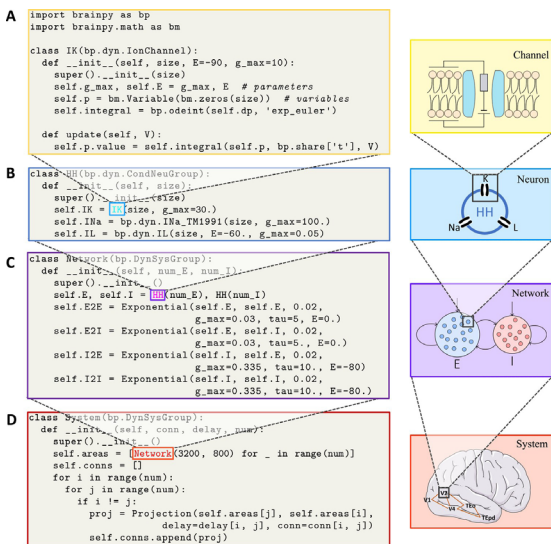
V. 주요 브레인모픽 시뮬레이터 분석

뉴런을 단위로 뇌를 재구성하는 작업은 형태적, 전기생리학적, 생화학적, 분자적 특성에 따라 뉴런을 분류하고, 뇌 영역, 신경 그룹, 개별 뉴런 간의 연결성을 재현하는 방향으로 발전해왔다. 이러한 재구성은 뇌 기능과 행동을 설명하는 신경 메커니즘을 이해하는 데 중요한 역할을 했지만, 뇌의 방대한 규모와 복잡성으로 인해 실험적, 이론적 접근에 한계가 있었다.

이를 보완하기 위해 브레인모픽 시뮬레이션 기술이 도입되었으며, 이는 다양한 수준에서 뇌의 구조와 기능을 재현하고 분석하는 데 유용하다. 이 장에서는 분자 및 세포 수준에서부터 전뇌 수준에 이르기까지 여러 브레인모픽 시뮬레이터의 기술 동향을 살펴보고, 각 계층별 시뮬레이션 기술의 특징을 분석하고자 한다.

1. 분자 및 아(亞)세포 수준 시뮬레이터

Molecular and Subcellular 시뮬레이터는 분자 및 세포 내 생물학적 과정을 시뮬레이션하고 분석하는 도구와 기술을 통합한 연구 분야이다. 이 시뮬레이터들은 단백질 구조 정보를 바탕으로 분자 간 상호작용을 예측하고, 동역학적 매개변수를 추정하며, 세포 내 생화학 네트워크를 모델링하는 데 중요한 역할을 한다[41]. 예를 들어, 신경전달물질과 수용체의 결합, 이온 채널의 열림과 닫힘, 시냅스에서의 신호 전달 과정을 시뮬레이션하여 신호 전달에 필요한 매개변수를 예측할 수 있다.



출처 C. Wang, T. Zhang, X. Chen, S. He, S. Li, and S. Wu, "BrainPy, a flexible, integrative, efficient, and extensible framework for general-purpose brain dynamics programming," eLife, vol. 12, p. e86365, Dec. 2023, doi: 10.7554/eLife.86365

그림 3 다수준(Multi-Scale) 브레인모픽 시뮬레이터

대표적인 기법으로는 분자 동역학 시뮬레이션 (MD)이 있으며, 이는 단백질이나 리간드(신경전달 물질 또는 약물)의 움직임을 시간에 따라 모사하여 분자 간 상호작용을 분석한다. 신경전달물질이 수용체에 결합하고 이탈하는 과정을 이해하고, 약물이 이 과정에 미치는 영향을 평가할 수 있다. 또한, 리간드 결합 모델링을 통해 신경계 단백질과 약물 또는 신경전달물질 간의 결합 강도와 그로 인한 구조적 변화를 예측하여 질한 치료제 개발에 활용할 수 있다.

주요 시뮬레이터로는 ArDock(단백질-리간드 결합 분석), BioExcel Building Blocks(대규모 분자 동역학 시뮬레이션 지원), CGMD Platform(대규모 분자 시스템 시뮬레이션)이 있으며, 각 도구는 분자적 수준에서 신경계의 동역학적 변화를 연구하는 데 사용된다.

결론적으로, 이러한 미시적 시뮬레이션은 신경 시스템의 작동 원리를 이해하고 더 큰 규모의 현상을 설명하는 데 중요한 역할을 하지만, 계산 비용이 높고 대규모 신경 시스템으로 확장하는 데 한계가 있다.

2. 다중 구획(Multi-Compartmental) 뉴런 모델 시뮬레이터

뉴런은 단순히 하나의 구획이 아닌, 여러 구조적 부분으로 이루어져 있으며, 특히 수상돌기(Dendrite), 축삭돌기(Axon), 세포체(Soma) 등 다양한 기능적 구획을 포함한다. 각 구획들은 고유의 전기적 특성과 생리학적 역할을 가지고 있다.

다중 구획 모델은 뉴런의 해부학적 구조를 최대한 정확하게 반영하여, 각 구획에서 발생하는 전기적 활동을 독립적으로 시뮬레이션할 수 있는 도구이다. 이 모델은 케이블 방정식과 이온 채널 방정식을 통해 구획에 따라 수동적/능동적 전기적 특성을 모델링한다. 또한 구획별로 다양한

이온 채널 밀도를 지정하여 불균일한 채널 분포를 모델링할 수 있다. 그리고 실린더 모델은 뉴런의 복잡한 구조를 단순화하여 각 구획을 원통형(실린더) 구조로 표현하며, 각 구획의 전기적 활동을 효율적으로 계산할 수 있다.

다중 구획 모델은 뉴런의 해부학적 구조와 공간적 특성을 정밀하게 반영하여 신호 전달 및 처리 과정을 시뮬레이션하는 방식이다. 예를 들어, 소뇌의 푸르킨에 세포는 평행섬유와 클라이밍 섬유로부터 시냅스 입력을 받으며, 수상돌기 위치에 따라 신호가 다르게 처리된다. 단일 구획 모델은 뉴런을 단순한 전기적 등가회로로 취급하여 이러한 공간적 차이를 반영하지 못하는 반면, 다중 구획 모델은 수상돌기와 축삭을 여러 구획으로 나누어 각 구획의 전기적 특성과 시냅스 입력을 독립적으로 고려한다. 이를 통해 푸르킨에 세포 내에서 발생하는 복잡한 신호 처리가 정확히 재현되며, 이를 바탕으로 소뇌의 운동 조정과 타이밍 조절에 대한 연구가 더 깊이 이루어질 수 있다. 이렇게 뉴런의 구조적 특성과 기능적 상호작용을 정확히 분석함으로써 소뇌의 운동 조정과 타이밍 조절 작동 원리에 대한 더 깊은 이해를 제공한다.

NEURON은[39] 뉴런의 다중 구획 모델을 지원하며 뉴런 간 상호작용, 신경전달물질 전달 메커니즘, 시냅스 반응 등을 시뮬레이션할 수 있다. 이 도구는 대규모 신경 네트워크 연구에도 활용될 수 있으며, 전자현미경 데이터를 바탕으로 뉴런의 3D 구조를 정밀하게 재현할 수 있다.

특히, 쥐의 해부학적 데이터를 활용해 31,000여 개의 뉴런과 55개의 층별 구조, 207개의 뉴런 유형으로 구성된 신피질 미세회로를 NEURON을 통해 모델링한 연구가 대표적이다[42]. 이 모델은 *in vivo* 및 *in vitro* 실험 결과와 비교하여 모델의 신뢰성을 검증하였다.

3. 점 뉴런 및 네트워크 수준 시뮬레이터

점 뉴런 모델은 뉴런을 단일 전기적 신호 처리 단위로 추상화하여 뉴런 간 상호작용과 신경망의 대규모 동역학을 효율적으로 시뮬레이션하는 데 최적화된 경량화 모델이다. 이 접근 방식은 뉴런의 복잡한 해부학적 구조를 간소화하고 전기 신호의 전파 과정에 초점을 맞추므로써 대규모 신경 네트워크의 동적 특성과 집단 행동을 분석하는 데 탁월하다. 주로 Spiking Neuron Network(SNN) 모델을 기반으로 하며, 다음과 같은 대표적인 뉴런 방정식들이 활용된다:

- Hodgkin-Huxley(HH) 모델: 나트륨(Na), 칼륨(K), 칼슘(Ca) 이온 채널 개폐에 따른 동역학을 미분방정식으로 표현하여 뉴런의 활동 전위를 높은 정확도로 재현. 계산 복잡성으로 인해 대규모 네트워크 시뮬레이션에는 제한적
- Integrate-and-Fire(IF) 모델: 뉴런의 막전위가 임계값에 도달하면 스파이크를 발생시키고 재설정되는 간소화된 모델. 대규모 시뮬레이션에 적합. 뉴런의 실제 활동과 차이가 발생할 수 있음
- Leaky Integrate-and-Fire(LIF) 모델: IF 모델을 확장하여 입력이 없을 때 막전위의 자연적 감쇠를 포함시킨 모델. 계산 효율성과 생물학적 타당성 사이의 균형적인 모델임
- Izhikevich 모델: HH 모델의 생물학적 정확성과 IF 모델의 계산 효율성을 결합한 모델. 두 개의 상미분방정식(ODE)으로 다양한 뉴런 발화 패턴을 재현. 복잡한 신경망 동역학 연구에 널리 사용됨

이외에도 스파이크 빈도와 부드러운 스파이크 개시를 포함한 Adaptive Exponential Integrate-and-Fire(AdEx) 모델, 연속적인 시간 단계 대신 이벤

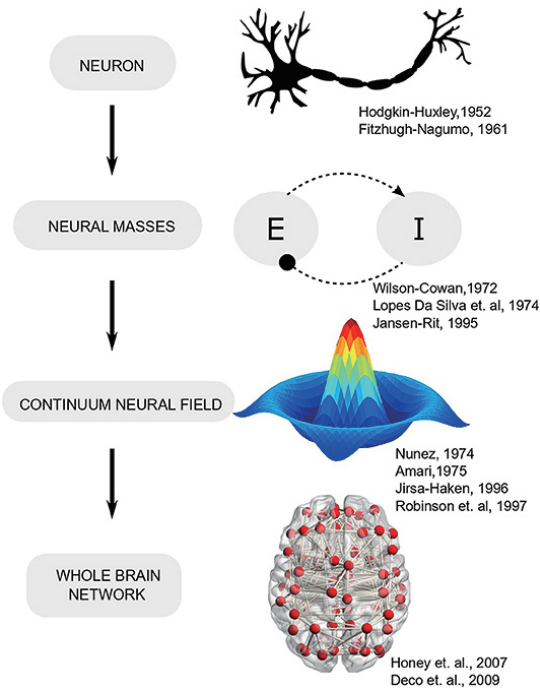
트가 발생할 때만 계산을 수행하여 계산 자원 최적화를 수행하는 이벤트 기반 시뮬레이션 등 다양한 뉴런 모델이 있다.

대표적인 시뮬레이션 도구로는 NEST와 Brian2가 있으며, 이들은 다양한 규모의 신경망 모델링과 분석을 지원한다. NEST는[43] 대규모 신경망 시뮬레이션에 특화된 플랫폼으로, MPI와 OpenMP를 결합한 병렬화, 하드웨어 가속화 기법을 통해 수십억 개의 뉴런을 효과적으로 처리할 수 있으며 신경 회로의 동적 특성과 대규모 뉴런 집합체의 상호작용을 시뮬레이션하는 데 좋은 성능을 보인다. 수십~수백만 개의 뉴런과 시냅스를 처리할 수 있는 NEST는 신경조질물질의 확산 효과를 고려한 체적 전달(Volume Transmission) 모델링도 가능하다. 특히 스파이킹 뉴런 네트워크 모델링에 최적화되어 있으며, 포유류 뇌의 특정 영역(시각 피질, 청각 피질 등)에 대한 동작 메커니즘 연구에 주로 사용된다. Brian2는[44] 사용자 정의 방정식을 머신 레벨 코드로 자동 변환하여 고성능 시뮬레이션을 지원하며, 적응형 시간 스텝을 통해 계산 효율성과 정확도를 최적화할 수 있다. 또한, 복잡한 시냅스 가소성 규칙을 구현할 수 있는 문법을 제공한다.

점 뉴런 시뮬레이터는 대규모 네트워크의 집단적 행동을 시뮬레이션하고, 이를 통해 정보 처리, 신경 가소성, 동기화 및 비동기화 활동과 같은 신경망의 중요한 특성을 분석하는 데 효과적인 도구가 된다.

4. 전체 뇌 시뮬레이터

전뇌 시뮬레이터는 뇌 전체의 신경 네트워크를 재현하여 뇌의 거시적 상호작용을 분석하는 도구로, 뉴런 개별 수준의 세밀한 해상도를 표현하지 않는 대신, 광범위한 뇌 영역 간의 상호작용을 모델링할 수 있다. 이 도구는 커넥톰 혹은 뉴럴 맵스(Neural



출처 A. Pathak, D. Roy, and A. Banerjee, "Whole-Brain Network Models: From Physics to Bedside," *Front. Comput. Neurosci.*, vol. 16, p. 866517, May 2022. doi: 10.3389/fncom.2022.866517

그림 4 뉴런에서 전체 뇌 네트워크까지의 모델링 단계

-mass), 즉 뇌의 구조적 연결망을 바탕으로 각 영역 간의 상호작용과 더 큰 스케일에서의 신경 활동을 시뮬레이션한다[7]. 개별 뉴런의 세부 활동보다는 뇌 영역 간의 전체적인 상호작용과 정보 흐름에 초점을 맞추어, 뇌의 기능적 네트워크와 대규모 동역학을 이해하는 데 큰 도움을 준다(그림 4 참고).

대표적인 전뇌 시뮬레이터로는 The Virtual Brain(TVB)[45]이 있다. TVB는 뇌의 다양한 영역 간 연결성과 협력 메커니즘을 모델링하여 뇌의 전체적인 기능과 행동을 이해하는 데 중요한 역할을 한다. 이 시뮬레이터는 EEG, fMRI, DTI(Diffusion Tensor Imaging) 등 비침습적 신경 활동 데이터를 기반으로 뇌 영역 간 상호작용을 정밀하게 분석한다. TVB의 주요 특징 중 하나는 개인화된 뇌 시뮬레이션 지원이다. 뇌 스캔 데이터를 활용하여 개인에 특화된 신

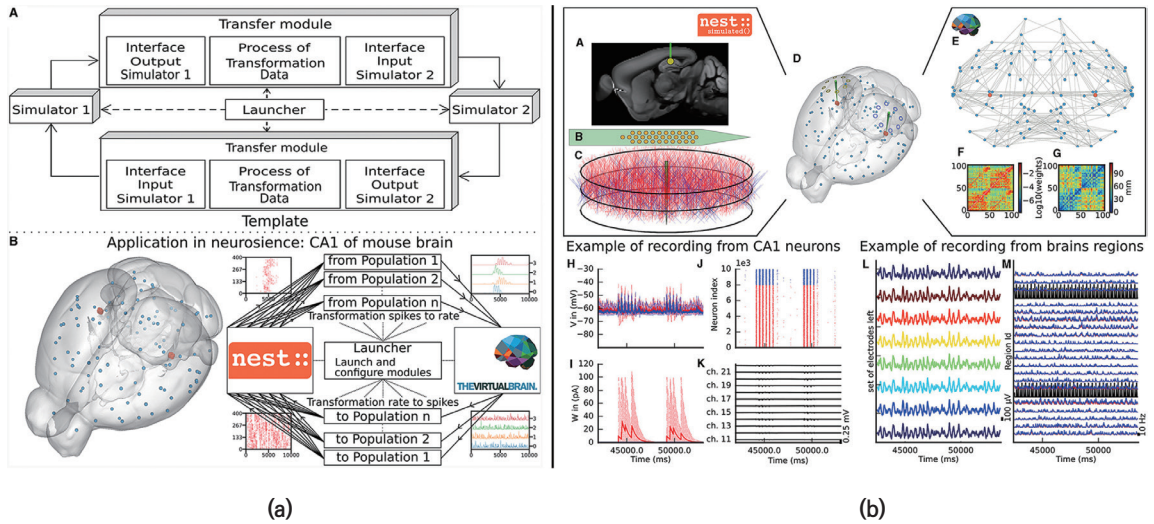
경망 모델을 구성할 수 있어, 개별 환자의 뇌 활동을 정확하게 모사할 수 있다[46]. 이러한 개인화된 모델링 접근법은 신경학적 질환 연구에서 특히 유용하다. 알츠하이머, 간질, 뇌졸중 등의 질환에서 뇌의 전역적 변화를 실시간으로 시뮬레이션하고, 특정 치료법이 뇌에 미치는 영향을 관찰할 수 있다. 이를 통해 질병의 진행 과정을 더 잘 이해하고, 개인 맞춤형 치료 전략을 개발하는 데 활용될 수 있다.

5. 다수준(Multi-Scale) 통합적 접근

다수준 모델링은 뇌의 여러 계층 간 정합을 목표로 한다. 이 접근법은 분자 수준의 정보를 뉴런 모델에 통합하고, 이를 대규모 신경 네트워크 시뮬레이션으로 확장한다. 다양한 해상도의 뇌 활동 데이터를 통합할 수 있는 기반을 제공하며, 생물학적 정밀성과 계산 효율성 사이의 균형을 추구한다. 이를 통해 특정 상황에서는 세밀한 뉴런 모델링으로 상세 분석을, 대규모 네트워크에서는 연산 효율성을 확보한다.

예를 들어, 해마 CA1 피라미드 뉴런 모델링에서는 공간적, 시간적 해상도를 모두 고려해야 한다. 복잡한 시냅스 통합과 가소성을 처리하기 위해 다중 구획 모델을 통해 수상돌기의 비선형 신호 처리를 포착하고, 뉴런의 구조적, 전기적 특성을 정확히 반영한다[47]. 반면, 점 뉴런 모델은 뉴런의 형태적 복잡성을 단순화하여 대규모 신경망 시뮬레이션의 효율성을 높인다.

시간적 해상도 측면에서, 해마의 장기 기억 형성 과정은 다수준 모델링의 필요성을 잘 보여준다. 시냅스 가소성은 밀리초 단위의 스파이크 타이밍부터 주 단위의 장기 기억 형성까지 광범위한 시간 척도를 포괄한다[48]. 시간적 스케일 차이를 극복하기 위해서는 계층 간 원활한 정보 교환이 필수적이다.



출처 L. Kusch et al., "Multiscale co-simulation design pattern for neuroscience applications," Front. Neuroinformatics, vol. 18, Feb. 2024, doi: 10.3389/fninf.2024.1156683

그림 5 다수준 공동 시뮬레이터를 통한 쥐 해마 CA1 영역과 전체 뇌 영역 간 상호작용 분석: (a) NEST/TVB 시뮬레이터 간 데이터 변환 및 전달 구조, (b) 해마 CA1 뉴런과 뇌 영역 간 신경망 연결과 신경 신호 연계

멀티스케일 시뮬레이션의 대표적 사례로, 쥐 해마 CA1 영역을 전뇌 맥락에서 통합 분석하는 연구가 있다[49]. 이 연구는 해마 CA1의 국소장전위(LFP)와 대뇌피질의 피질전도(ECoG) 신호를 동시에 수집하여 공동 시뮬레이션(Co-simulation)을 수행한다. 이를 통해 해마 기능이 전뇌 활동에 미치는 영향과 그 역학 관계를 포괄적으로 분석한다(그림 5 참고).

EBRAINS 인프라의 TVB 소프트웨어는 공동 시뮬레이션을 위한 두 가지 핵심 툴킷을 제공한다. TVB-Multiscale은 신속한 사용 사례 개발과 시뮬레이션 테스트를 지원하며, 병렬 공동 시뮬레이션은 대규모 신경 네트워크 시뮬레이션의 성능을 최적화한다. TVB-Multiscale의 대표적 사례로는 가상 심부 뇌 자극 연구가 있다[50,51].

멀티스케일 시뮬레이터는 세포 수준에서 대규모 신경망까지 다양한 계층의 신경 활동을 통합적으로 연구할 수 있게 해준다[52]. 이를 통해 뇌의 다층적 정보 처리 메커니즘을 분석하고, 학습과 기억 형성

같은 고차원적 인지 기능에 대한 중요한 통찰을 제공할 수 있다.

6. 인지 및 행동 모델 시뮬레이터

인지 및 행동 모델 시뮬레이터는 신경과학과 인공지능 연구에서 뇌의 인지 기능을 재현하고 분석하는 데 사용되는 도구이다. 이 시뮬레이터는 감각 처리, 학습, 기억, 의사결정과 같은 인지 기능과 행동을 연구할 수 있게 하며, 신경 회로의 작동 원리와 뇌의 정보 처리 메커니즘을 시뮬레이션함으로써 신경 회로의 동작 방식을 이해하는 데 기여한다[21].

대표적으로 BrainCog[40], BindsNET[53] 등은 뇌에서 영감을 받은 인공지능 및 신경과학 연구를 위한 통합 프레임워크이다. BrainCog의 핵심 목표는 뇌의 구조와 기능을 모방하여 인공지능 시스템을 개발하고, 뇌의 신경 회로와 인지 기능을 파악하는 것이다. Brain-inspired AI를 구축하기 위한 도구로,

감각 처리, 학습, 기억, 의사결정과 같은 뇌의 인지 기능을 모사하는 데 적합하다.

VI. 뉴런 레벨의 전뇌 시뮬레이션을 위한 신경정보학의 진보와 과제

신경정보학은 브레인모픽 시뮬레이션이 신경 네트워크와 특성을 디지털 환경에서 재현할 수 있는 기반을 제공한다. 개별 뉴런의 재구성, 연결성 맵핑, 기능적 영역의 통합적 이해를 통해 시뮬레이션 정확도를 확보할 수 있다.

브레인모픽 시뮬레이션의 핵심은 뉴런 특성을 정밀하게 모델링하는 것이다. 초기 연구는 뉴런 간 전기적 활동을 재현했고[54], 이후 위상적 특징을 바탕으로 형태적 분류법을 개발했다[55]. 또한, 이온 채널 유전자 조합에 기반한 자동화 된 전기적 분류법을 개발했다[56]. 현재는 단일 뉴런 오믹스(Omics)를 통해 유전체, 전사체, 후성유전체, 단백질 등의 다차원적 뉴런 유형을 분류하고, 각 세포의 고유 정체성을 유지하는 분자적 특징 식별 연구도 진행 중이다.

뉴런의 연결성 연구는 커넥토믹스를 통해 뇌의 연결체계를 매크로, 메조, 마이크로, 나노 수준에서 맵핑하여 뇌 기능과의 관계를 해석한다. Brainbow[57], Clarity[58]와 같은 세포 표지 기술로 뉴런에 고유한 색상을 부여해 신경망 연결성을 추적한다. 단일 시냅스 수준에서의 해석은 현 수준에서는 어려우며, 인간 뇌 전체 뉴런 맵핑에는 많은 데이터와 시간이 필요할 것으로 보인다[59]. 뇌의 기능적 연결성은 뉴런 간 통계적 상관관계를 보여준다. fMRI, DTI 등의 뇌영상 기술로 뇌 활성화 지도를 만들 수 있지만, 현재 시공간 해상도에 제한이 있다. 초고해상도/초고속 신경 영상, 광유전학 등 새로운 기술은 이러한 한계를 극복하고 뇌 활동과 인과관계를 더욱 정밀하게 분석할 수 있게 한다. 뇌 아틀라

스는 뉴런의 형태, 연결성, 기능적 특성을 종합적으로 보여주는 중요한 도구다. 종합적인 뇌의 구조와 함께 각 영역의 세포 밀도와 위치 정보를 정밀하게 제공하는 Allen Mouse Brain Atlas가 대표적 예시다 [35]. 이러한 아틀라스는 뇌 네트워크를 시뮬레이션의 정확도를 높이고, 연구자들이 뇌의 구조적 및 기능적 통합 모델을 구축할 수 있게 한다.

뇌는 분자 및 세포 수준에서 지속적으로 재구성되는 동적 시스템이다[60]. 세포는 외부 자극과 내부 신호에 반응해 유전자 발현과 표현형을 동적으로 변화시키기에[61] 일시의 측정은 스냅샷에 불과하다. 뇌의 이러한 역동성을 포착하기 위해 고해상도 실시간 측정 기술, 고처리량 이미지 분석, AI 자동화, 대규모 병렬 처리 기술의 발전이 필수적이다.

VII. 브레인모픽 시뮬레이터의 향후 발전 방향

이처럼 브레인모픽 시뮬레이터는 뇌 기능을 계산 모델로 시뮬레이션하고 설명하는 핵심 도구로 부상하고 있다. 해외의 대규모 뇌 과학 프로젝트들의 진행으로 신경 시스템에 대한 방대한 데이터가 축적되고 있으며, 이러한 데이터를 효과적으로 해석하고 활용하기 위해 계산 모델링의 중요성이 더욱 강조되고 있다.

브레인모픽 시뮬레이터의 발전을 위해 기존 연구 [62]에서 제시된 주요 요구사항을 바탕으로, 추가적인 고찰을 통해 다음과 같이 보완된 요구사항을 도출하였다.

첫째, 유연하고 확장 가능한 다수준 모델링 프레임워크가 필요하다. 뇌는 다양한 수준에서 모듈화되고 계층적으로 조직되어 있어, 뉴런, 네트워크, 회로 등 서로 다른 수준에서 모델을 구성하고 통합할 수 있는 프레임워크가 요구된다.

- 모듈성: 다수준의 모델을 독립적으로 개발하고, 필요에 따라 연결할 수 있는 모듈식 구조를 지원해야 한다.
- 유연성: 각 수준에서 다양한 모델링 방식(동역학 모델, 생리적 모델, 그래프 모델, 확률 모델 등)을 선택적으로 적용할 수 있어야 한다.
- 확장성: 특정 뇌 영역이나 기능에 초점을 맞춘 모델에서 시작하여 점진적으로 확장할 수 있는 구조여야 한다.
- 인터페이스 표준화: 서로 다른 수준의 모델 간 정보 교환을 위한 표준화된 인터페이스를 제공해야 한다.

둘째, 시뮬레이션뿐만 아니라 데이터를 기반으로 뇌 구조 재현, 모델을 학습할 수 있는 기능이 필요하다. 현재 측정 기술의 한계로 인해 뇌 연구에서는 대부분 통계적/추론 방법론이 적용되고 있으므로, 데이터 기반 모델링 도구가 요구된다. 또한 시뮬레이션, 학습, 분석을 통합하는 플랫폼이 필수적이며, 현재 시뮬레이터들은 주로 시뮬레이션에만 초점을 맞추고 있어 이러한 요구를 완전히 충족하지 못하고 있다.

셋째, 시뮬레이터는 고성능 컴퓨팅과 사용자 친화적인 프로그래밍 환경을 동시에 제공해야 한다. 현재의 기술적 언어 기반 방식은 높은 성능을 제공하지만 유연성과 확장성이 제한적이므로, 직관적인 사용성과 고성능을 모두 충족하는 시스템 개발이 요구된다. 또한, 대규모 신경망 시뮬레이션의 효율성 향상을 위해 뉴로모픽 칩과 같은 특수 하드웨어와의 백엔드 연동이 필수적이다. 이는 딥러닝 시스템에서 NPU 플랫폼 연동 시 발생하는 중간 계층 호환성 문제와 유사한 맥락으로, 브레인모픽 시뮬레이터에서도 다양한 하드웨어 플랫폼과의 원활한 통합을 위한 표준화된 백엔드 연동 계층의 구현이 필

요하다[6].

넷째, 신경과학 데이터 및 신경회로 모델링의 표준화가 필요하다. 뇌 연구에서는 다양한 종류의 데이터가 사용되며, 표준화된 데이터 형식 및 모델 포맷이 필요하다. 이는 데이터 공유와 재사용을 촉진하며, 모델 개발과 검증 과정을 단순화하고 효율성을 높일 수 있다.

- 데이터 표준화: BIDS, NWB, NIfTI 등은 신경과학 데이터의 저장 및 공유를 위한 표준을 제공하고 있다.
- 모델링 언어: NeuroML, SBML, CellML, PyNN 등은 신경망 및 생물학적 시스템의 모델링과 시뮬레이션을 지원하고 있다.

이러한 요구사항들을 충족시키는 브레인모픽 시뮬레이터의 개발은 뇌 연구의 발전을 가속화 할 것이다. 또한, 이는 신경과학, 인공지능, 계산 신경과학 등 다양한 분야의 융합 연구를 촉진하는 중요한 도구로 자리매김할 것으로 기대된다.

VIII. 결론

브레인모픽 시뮬레이터는 신경과학 연구에서 뇌의 복잡한 메커니즘을 이해하기 위한 핵심 도구로 자리 잡고 있다. 기존 실험적 연구의 한계를 보완하며, 고성능 컴퓨팅과 빅데이터 기술을 활용하여 뇌의 구조와 기능을 정밀하게 재현함으로써 뇌 연구의 새로운 패러다임을 제시하고 있다. 이를 통해 뇌 질환 연구, 인공지능 개발, 인지 기능 분석 등에서 큰 혁신적 성과를 기대할 수 있다.

그러나 현존하는 브레인모픽 시뮬레이터는 기술적 한계와 윤리적 과제에 직면해 있다. 뇌의 복잡성을 완벽히 시뮬레이션하는 것이 현재 기술로는 불가능하며, 시뮬레이션 결과를 실제 생물학적 시스템

템과 연결하는 데 어려움이 있다. 또한, 데이터 보안과 연구 윤리 문제도 중요한 고려 사항이다.

향후 발전을 위해 더 유연하고 확장 가능한 시뮬레이션 프레임워크가 필요하며, 뇌의 계층적 구조를 반영한 모듈식 접근이 요구된다. 또한, 고성능 컴퓨팅과 직관적인 사용자 환경을 제공하는 시스템의 개발, 뉴로모픽 칩과 같은 특수 하드웨어와의 연동이 필요하다. 이러한 발전은 브레인모픽 시뮬레이터를 뇌 연구뿐만 아니라 신경공학과 인공지능의 핵심 도구로 자리 잡게 할 것이며, 궁극적으로 인간 지성의 본질을 규명하는 데 이바지할 수 있을 것이다.

용어해설

브레인모픽 시뮬레이터(Brain-morphic Simulator) 뇌의 구조와 기능을 컴퓨터 모델로 정밀하게 재현하는 기술로, 데이터 기반 모델링과 고성능 컴퓨팅 기술을 이용하여 뇌의 복잡한 메커니즘을 이해하고 새로운 가설을 검증하는 데 기여
창발적 특성(Emergent Property) 복잡한 시스템에서 구성 요소들의 상호작용으로 인해 개별 요소에서는 나타나지 않는 새로운 특성이 나타나는 현상으로, 의식이나 인지 기능과 같은 고차원적 특성을 설명하는 데 사용됨

약어 정리

BBP	Blue Brain Project
BRAIN	The Brain Research Through Advancing Innovative Neurotechnologies
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DTI	Diffusion Tensor Imaging
EBRAINS	European Brain ReseArch InfrastructureS
HBP	Human Brain Project
HPC	High-Performance Computing
MPI	Message Passing Interface
NIH	National Institutes of Health
NPU	Neural Processing Unit
SNN	Spiking Neural Network

TVB The Virtual Brain

참고문헌

- [1] F.A.C. Azevedo et al., "Equal numbers of neuronal and nonneuronal cells make the human brain an isometrically scaled-up primate brain," J. Comp. Neurol., vol. 513, no. 5, pp. 532-541, Apr. 2009, doi: 10.1002/cne.21974.
- [2] X. Fan and H. Markram, "A Brief History of Simulation Neuroscience," Front. Neuroinf. vol. 13, May 2019.
- [3] G.M. Shepherd et al., "The first images of nerve cells: Golgi on the olfactory bulb 1875," Brain Res. Rev., vol. 66, no. 1-2, pp. 92-105, Jan. 2011.
- [4] A.L. Hodgkin and A.F. Huxley, "A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve," J. Physiol., vol. 117, no. 4, pp. 500-544, Aug. 1952.
- [5] D.H. Hubel and T.N. Wiesel, "Effects of monocular deprivation in kittens," Naunyn-Schmiedeberg's Arch. Für Exp. Pathol. Pharmacol., vol. 248, no. 6, 1964, pp. 492-497. doi: 10.1007/BF00348878
- [6] E. Nozari et al., "Macroscopic resting-state brain dynamics are best described by linear models," Nat. Biomed. Eng., vol. 8, no. 1, 2024, pp. 68-84, Jan. 2024, doi: 10.1038/s41551-023-01117-y
- [7] S. Lang et al., "Computational modeling of whole-brain dynamics: a review of neurosurgical applications," J. Neurosurg., vol. 140, no. 1, 2024, pp. 218-230.
- [8] T.E. Feinberg and J. Mallatt, "Phenomenal Consciousness and Emergence: Eliminating the Explanatory Gap," Front. Psychol., vol. 11, Jun. 2020.
- [9] D. Levenstein et al., "On the Role of Theory and Modeling in Neuroscience," J. Neurosci., vol. 43, no. 7, 2023, pp. 1074-1088.
- [10] M. Meier-Schellersheim, I. D. C. Fraser, and F. Klauschen, "Multiscale modeling for biologists," Wiley Interdiscip. Rev. Syst. Biol. Med., vol. 1, no. 1, 2009, pp. 4-14.
- [11] H.-R. Peng, Y.-K. Zhang, and J.-W. Zhou, "The Structure and Function of Glial Networks: Beyond the Neuronal Connections," Neurosci. Bull., vol. 39, no. 3, 2023, pp. 531-540.
- [12] M.-L. Linne et al., "Neuron-Glia Interactions and Brain Circuits," in Computational Modelling of the Brain: Modelling Approaches to Cells, Circuits and Networks, M. Giugliano, M. Negrello, and D. Linaro, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 87-103.
- [13] A. Devor et al., "The Challenge of Connecting the Dots in the B.R.A.I.N.," Neuron, vol. 80, no. 2, 2013, pp. 270-274.

- [14] L.E. Been et al., "Hormones and neuroplasticity: A lifetime of adaptive responses," *Neurosci. Biobehav. Rev.*, vol. 132, 2002, pp. 679-690.
- [15] E. D'Angelo et al., "Realistic modeling of neurons and networks: towards brain simulation," *Funct. Neurol.*, vol. 28, no. 3, 2013, pp. 153-166.
- [16] G.T. Einevoll et al., "The Scientific Case for Brain Simulations," *Neuron*, vol. 102, no. 4, 2019, pp. 735-744.
- [17] G. Tarricone, I. Carmagnola, and V. Chiono, "Tissue-Engineered Models of the Human Brain: State-of-the-Art Analysis and Challenges," *J. Funct. Biomater.*, vol. 13, no. 3, 2022.
- [18] S. Kim and M.-Y. Chang, "Application of Human Brain Organoids—Opportunities and Challenges in Modeling Human Brain Development and Neurodevelopmental Diseases," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 24, no. 15, 2023. doi: 10.3390/ijms241512528
- [19] M. Zolfagharinejad et al., "Brain-inspired computing systems: a systematic literature review," *Eur. Phys. J. B*, vol. 97, no. 6, p. 70, Jun. 2024.
- [20] A. Mehonic and A.J. Kenyon, "Brain-inspired computing needs a master plan," *Nature*, vol. 604, no. 7905, 2022, pp. 255-260.
- [21] G. Li et al., "Brain-Inspired Computing: A Systematic Survey and Future Trends," *Proc. IEEE*, vol. 112, no. 6, 2024, pp. 544-584.
- [22] C.D. Schuman et al., "A Survey of Neuromorphic Computing and Neural Networks in Hardware," *arXiv preprint*, 2017. doi: 10.48550/arXiv.1705.06963
- [23] J. Ren and F. Xia, "Brain-inspired Artificial Intelligence: A Comprehensive Review," *arXiv preprint*, 2024. doi: 10.48550/arXiv.2408.14811
- [24] L. Zhao et al., "When Brain-inspired AI Meets AGI," *arXiv preprint*, 2023. doi: 10.48550/arXiv.2303.15935
- [25] D. Hassabis et al., "Neuroscience-Inspired Artificial Intelligence," *Neuron*, vol. 95, no. 2, 2017, pp. 245-258.
- [26] C. Lv et al., "Towards Biologically Plausible Computing: A Comprehensive Comparison," *arXiv preprint*, 2024. doi: 10.48550/arXiv.2406.16062
- [27] C. Pehle et al., "The BrainScaleS-2 Accelerated Neuromorphic System With Hybrid Plasticity," *Front. Neurosci.*, vol. 16, 2022.
- [28] D. Ma et al., "Darwin3: a large-scale neuromorphic chip with a novel ISA and on-chip learning," *Natl. Sci. Rev.*, vol. 11, no. 5, 2024.
- [29] B.R. Geib et al., "Hippocampal Contributions to the Large-Scale Episodic Memory Network Predict Vivid Visual Memories," *Cereb. Cortex*, vol. 27, no. 1, 2017, pp. 680-693.
- [30] The BRAIN Initiative®, Working Group, BRAIN 2025: A Scientific Vision, June 2014.
- [31] K.B. Baker et al., "Cerebellar Deep Brain Stimulation for Chronic Post-stroke Motor Rehabilitation: A Phase I Trial," *Nature Med.*, vol. 29, 2023, pp. 2366-2374.
- [32] J.D. Steinmetz et al., "Global, Regional, and National Burden of Disorders Affecting the Nervous System, 1990-2021: A Systematic Analysis for the Global Burden of Disease Study 2021," *The Lancet Neurology*, vol. 23, no. 4, 2024, pp. 344-381.
- [33] M.I. Gabitto et al., "Integrated Multimodal Cell Atlas of Alzheimer's Disease," *Research Square*, 2023.
- [34] Seattle Alzheimer's Disease Brain Cell Atlas, <https://portal.brain-map.org/explore/seattle-alzheimers-disease>
- [35] Allen Brain Map, <https://portal.brain-map.org/>
- [36] Human Brain Project, <https://www.humanbrainproject.eu/en/>
- [37] EBRAINS, <https://www.ebrains.eu/>
- [38] Blue Brain Project, <https://www.epfl.ch/research/domains/bluebrain/>
- [39] NEURON Simulator, <https://www.neuron.yale.edu/neuron/>
- [40] Y. Zeng et al., "Braincog: A Spiking Neural Network based, Brain-inspired Cognitive Intelligence Engine for Brain-inspired AI and Brain Simulation," *Patterns*, vol. 4, no. 8, 2023.
- [41] A. Basu et al., "Protein Interaction Network Biology in Neuroscience," *Proteomics*, vol. 21, no. 3-4, 2021.
- [42] H. Markram et al., "Reconstruction and Simulation of Neocortical Microcircuitry," *Cell*, vol. 163, no. 2, 2015, pp. 456-492.
- [43] "NEST simulator." Accessed: Oct. 05, 2024. [Online]. Available: <https://nest-simulator.readthedocs.io/en/v3.3/contents.html>
- [44] M. Stimberg, R. Brette, and D.F. Goodman, "Brian 2, an intuitive and efficient neural simulator," *eLife*, vol. 8, 2019.
- [45] P. Ritter et al., "The Virtual Brain Integrates Computational Modeling and Multimodal Neuroimaging," *Brain Connect.*, vol. 3, no. 2, 2013, pp. 121-145.
- [46] "Virtual Brain Twin," *Virtual Brain Twin*. Accessed: Oct. 02, 2024. [Online]. Available: <https://www.virtualbraintwin.eu>
- [47] V. Sekulić, J.J. Lawrence, and F.K. Skinner, "Using Multi-Compartment Ensemble Modeling As an Investigative Tool of Spatially Distributed Biophysical Balances: Application to Hippocampal Oriens-Lacunosum/Moleculare (O-LM) Cells," *PLOS ONE*, vol. 9, no. 10, 2014.
- [48] D. Durstewitz, J.K. Seamans, and T.J. Sejnowski, "Neurocomputational models of working memory," *Nat.*

- Neurosci., vol. 3, no. 11, 2000, pp. 1184–1191.
- [49] L. Kusch et al., "Multiscale co-simulation design pattern for neuroscience applications," *Front. Neuroinf.*, vol. 18, 2024. doi: 10.3389/fninf.2024.1156683
- [50] J.M. Meier et al., "Virtual deep brain stimulation: Multiscale co-simulation of a spiking basal ganglia model and a whole-brain mean-field model with The Virtual Brain," *Exp. Neurol.*, vol. 354, 2022.
- [51] H. Shaheen, S. Pal, and R. Melnik, "Multiscale co-simulation of deep brain stimulation with brain networks in neurodegenerative disorders," *Brain Multiphy.*, vol. 3, 2022.
- [52] C. Wang et al., "BrainPy, a flexible, integrative, efficient, and extensible framework for general-purpose brain dynamics programming," *eLife*, vol. 12, 2023.
- [53] H. Hazan et al., "BindsNET: A Machine Learning-Oriented Spiking Neural Networks Library in Python," *Front. Neuroinform.*, vol. 12, 2018.
- [54] R.D. Traub, R. Miles, and R.K.S. Wong, "Large scale simulations of the hippocampus," *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.*, vol. 7, no. 4, 1988, pp. 31–38.
- [55] L. Kanari et al., "A Topological Representation of Branching Neuronal Morphologies," *Neuroinform.*, vol. 16, no. 1, 2018. pp. 3–13.
- [56] G. Khazen et al., "Combinatorial expression rules of ion channel genes in juvenile rat (*Rattus norvegicus*) neocortical neurons," *PloS One*, vol. 7, no. 4, 2012.
- [57] J. Livet et al., "Transgenic strategies for combinatorial expression of fluorescent proteins in the nervous system," *Nature*, vol. 450, no. 7166, 2007, pp. 56–62.
- [58] K. Chung et al., "Structural and molecular interrogation of intact biological systems," *Nature*, vol. 497, no. 7449, 2013, pp. 332–337.
- [59] L.W. Swanson and J.W. Lichtman, "From Cajal to Connectome and Beyond," *Annu. Rev. Neurosci.*, vol. 39, 2016, pp. 197–216.
- [60] A. Holtmaat and K. Svoboda, "Experience-dependent structural synaptic plasticity in the mammalian brain," *Nat. Rev. Neurosci.*, vol. 10, no. 9, 2009, pp. 647–658.
- [61] S. Cohen and M. E. Greenberg, "Communication between the synapse and the nucleus in neuronal development, plasticity, and disease," *Annu. Rev. Cell Dev. Biol.*, vol. 24, 2008, pp. 183–209.
- [62] Y. Zhang et al., "A system hierarchy for brain-inspired computing," *Nature*, vol. 586, no. 7829, 2020, pp. 378–384.