

Expert Clinical Opinion

Brain Network Perspective on Sensory Neuromodulation and Cognitive System Regulation

작 성 자: 부산대학교병원 신경과 전문의 이가현 교수
전문분야: 뇌전증, 수면의학, 임상신경생리학

1. Scope of Review

본 의견서는 삼차신경 감각 자극 기반 웨어러블 신경조절 장치 ACHELESS의 인지 기능 관련 잠재적 의미를 뇌 네트워크 및 인지 시스템 조절 관점에서 검토하기 위해 작성되었다.

최근 인지신경과학 연구에서는 기억, 주의, 실행 기능과 같은 인지 과정이 특정 단일 뇌 영역이 아니라 여러 뇌 네트워크의 상호작용(network interaction)을 통해 형성된다는 점이 강조되고 있다.

특히 다음과 같은 주요 뇌 네트워크가 인지 기능 유지와 밀접한 관련을 가진다.

- Default Mode Network (DMN)
- Salience Network
- Frontoparietal Control Network

이러한 네트워크 간 균형(network balance)은 정상적인 인지 기능 유지에 중요한 역할을 하며, 노화 및 신경퇴행성 질환에서는 기능적 연결성 변화가 관찰되는 경우가 많다. 따라서 감각 입력 기반 neuromodulation 접근이 brain network dynamics에 어떤 영향을 줄 수 있는지에 대한 탐색은 인지 기능 연구에서 의미 있는 연구 주제로 볼 수 있다.

2. Brain Network Regulation in Cognitive Function

인지 기능은 단일 뇌 영역이 아니라 분산된 신경 네트워크(distributed neural networks)의 상호작용을 통해 형성된다. 예를 들어 기억 형성 및 회상 과정은 다음과 같은 구조적·기능적 연결을 포함한다.

- 해마 (hippocampus)
- 전전두엽 (prefrontal cortex)
- 후대상피질 (posterior cingulate cortex)

또한 주의 조절(attention regulation)은 frontoparietal network와 밀접한 관련을 가진다. 최근 기능적 뇌영상 연구에서는 이러한 네트워크 간 functional connectivity 변화가 인지 기능 저하와 관련될 수 있음이 보고되고 있다. 특히 경도인지장애(MCI) 및 초기 알츠하이머병 환자에서는 다음과 같은 brain network 변화가 관찰될 수 있다.

- Default mode network connectivity 감소
- frontoparietal control network 기능 변화
- attentional network dysregulation

이러한 변화는 인지 기능 저하의 초기 신경생물학적 지표로 제시되기도 한다.

3. Sensory Neuromodulation and Brain Network Interaction

감각 자극은 뇌 네트워크 활성화에 영향을 줄 수 있는 중요한 입력 신호 중 하나이다. 삼차신경은 얼굴 감각을 담당하는 주요 뇌신경으로, 감각 입력은 뇌간을 거쳐 시상 및 대뇌 피질의 감각 영역으로 전달된다. 이러한 감각 신호는 단순한 체성감각 처리뿐 아니라 다음과 같은 뇌 네트워크와 상호작용할 가능성이 있다.

- Attentional network
- Arousal regulation network
- Thalamocortical sensory network

감각 자극 기반 neuromodulation 접근은 이러한 감각 입력을 활용하여 뇌 네트워크 활성화 상태를 조절할 가능성이 제기되어 왔다. 특히 최근 연구에서는 외부 감각 자극이 brain network synchronization에 영향을 줄 수 있다는 결과들이 보고되고 있다.

4. Cognitive System Interaction

인지 기능은 다양한 신경 네트워크 간의 dynamic interaction을 통해 형성된다. 예를 들어 다음과 같은 네트워크 간 상호작용이 중요하다.

- Default mode network ↔ attentional network
- Salience network ↔ executive control network

정상적인 인지 상태에서는 이러한 network balance가 유지되지만, 노화 및 신경 퇴행성 질환에서는 이러한 균형이 변화할 수 있다. 따라서 감각 입력 기반 neuromodulation 접근이 이러한 network balance에 영향을 줄 가능성에 대한 연구는 인지 기능 유지 전략 연구에서 중요한 의미를 가질 수 있다. 특히 비침습적 neuromodulation 기술은 반복적인 감각 자극을 통해 brain network activity modulation을 유도할 수 있는 가능성이 제기되고 있다.

5. Interpretation of Available Evidence

현재까지 보고된 신경과학 연구에서는 감각 자극 기반 neuromodulation이 뇌 네트워크 활성화에 영향을 줄 수 있는 가능성이 제시되고 있다. 특히 삼차신경 자극 기반 neuromodulation 기술은 다음과 같은 신경생리학적 변화와 관련될 수 있다.

- Cortical arousal modulation
- Attentional network activation

- Autonomic regulation

이러한 생리학적 변화는 뇌 네트워크의 기능적 연결성 및 인지 기능과 관련될 가능성이 제기되고 있다. 또한 일부 연구에서는 감각 자극 기반 neuromodulation 이 EEG 기반 cortical activity 변화와 관련될 수 있다는 결과도 보고된 바 있다. 다만 이러한 결과들은 대부분 초기 연구 단계에 해당하며, 인지 기능 변화와의 직접적인 연관성을 규명하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다. 변화와의 직접적인 연관성을 규명하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

6. Translational Potential

감각 자극 기반 neuromodulation 기술은 최근 다양한 신경계 질환 연구에서 비침습적 디지털 헬스케어 기술로 주목받고 있다. 특히 웨어러블 형태의 neuromodulation 장치는 다음과 같은 장점을 가진다.

- 비침습적 적용 가능
- 반복 사용 가능
- 일상 환경에서 사용 가능

이러한 특성은 인지 기능 관리 전략 연구에서 현실적인 적용 가능성을 높이는 요소로 볼 수 있다. 따라서 ACHELESS와 같은 감각 자극 기반 neuromodulation 장치는 향후 인지 기능 연구에서 brain network modulation 접근으로 탐색될 수 있는 기술적 가능성을 가진다.

7. Overall Clinical Assessment

현재까지 보고된 신경과학 연구를 종합적으로 고려할 때, 감각 자극 기반 neuromodulation 접근은 뇌 네트워크 활성 상태에 영향을 줄 수 있는 잠재적 가능성을 가진 기술로 평가될 수 있다. 특히 삼차신경 감각 입력은 뇌 네트워크와 기능적으로 연결된 감각 경로 중 하나로 알려져 있으며, 이러한 감각 입력을 활용한 neuromodulation 접근은 인지 기능 관련 연구에서 탐색할 가치가 있는 전략으로 볼 수 있다.

8. Expert Clinical Recommendation

신경과학 및 인지신경학적 관점에서 볼 때, 감각 자극 기반 neuromodulation 기술은 인지 기능 관련 뇌 네트워크 조절 연구에서 추가적인 탐색이 필요한 접근으로 판단된다. 특히 ACHELESS와 같은 웨어러블 감각 자극 장치는 비침습적 neuromodulation 기술로서 인지 건강 관리 및 치매 예방 연구 분야에서 brain network modulation 전략으로 활용될 가능성이 있다.

향후 체계적인 임상 연구가 수행된다면, 이러한 기술은 인지 기능 관련 디지털

헬스케어 연구 분야에서 의미 있는 기술적 발전 가능성을 가질 것으로 판단된다.

7. Key References in Brain Network Neuroscience

- (1) Buckner RL, Andrews-Hanna JR, Schacter DL. The brain's default network: anatomy, function, and relevance to disease. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2008.
- (2) Seeley WW, Menon V, Schatzberg AF, et al. Dissociable intrinsic connectivity networks for salience processing and executive control. *Journal of Neuroscience*, 2007.
- (3) Menon V. Large-scale brain networks and psychopathology: a unifying triple network model. *Trends in Cognitive Sciences*, 2011.
- (4) Fox MD, Raichle ME. Spontaneous fluctuations in brain activity observed with functional MRI. *Nature Reviews Neuroscience*, 2007.
- (5) Bressler SL, Menon V. Large-scale brain networks in cognition: emerging methods and principles. *Trends in Cognitive Sciences*, 2010.
- (6) Petersen SE, Posner MI. The attention system of the human brain: 20 years after. *Annual Review of Neuroscience*, 2012.
- (7) Shine JM, Breakspear M, Bell PT, et al. Dynamic network communication as a unifying neural basis for cognition, development, aging, and disease. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 2019.
- (8) Menon V, Uddin LQ. Saliency, switching, attention and control: a network model of insula function. *Brain Structure and Function*, 2010.
- (9) Hermans EJ, Henckens MJ, Joëls M, Fernández G. Dynamic adaptation of large-scale brain networks in response to stress. *Nature Neuroscience*, 2014.
- (10) Bassett DS, Sporns O. Network neuroscience. *Nature Neuroscience*, 2017.

2026년 03월 09일

부산대학교병원 신경과 교수 이가현 *이가현*

Reviewer Profile

Name: Gha-Hyun Lee

Affiliation: Department of Neurology, Pusan National University Hospital

Specialty: Epilepsy, Sleep Medicine, Clinical Neurophysiology

Brief Biography

- Education

- PhD in Medicine, Pusan National University, 2025

- MS in Medicine, University of Ulsan. 2009

- MD, University of Ulsan College of Medicine, 2004

- Professional Experience

- Assistant Professor (Endowment-funded), Dept. of Neurology, Pusan National University Hospital 2023–

- Clinical Associate Professor, Dept. of Neurology, Pusan National University Hospital 2013–2023

- Clinical Fellow, Dept. of Neurology, Asan Medical Center, University of Ulsan, 2011–2013

Selected Academic Contributions

- Lee G-H et al. Predicting antiseizure medication response in newly diagnosed epilepsy using quantitative EEG and machine learning. *Seizure*, 2025

- Lee G-H et al. Predicting oxcarbazepine-induced hyponatremia in adult epilepsy patients: a multicenter machine learning analysis using real-world CDM data. *Seizure*, 2025

- Lee G-H et al. Neuronal intranuclear inclusion disease initially mimicking reversible cerebral vasoconstriction syndrome. *Front. Neurol*, 2024