

Changes in Brain Functional Connectivity Following Cognitive Control Training in Older Adults*

Hoyoung Kim¹, Ehri Ryu², Jeanyung Chey^{3†}

¹Department of Psychology, Jeonbuk National University

²Department of Psychology and Neuroscience, Boston College

³Department of Psychology, Seoul National University

Cognitive control is a domain-general process essential for independent living and is particularly vulnerable to age-related decline. This study aimed to investigate the effects of cognitive control training on functional connectivity during both resting-state and cognitive control task performance, using data from Kim, Lee, and Chey (2017), which examined the impact of cognitive control training on cognitive function and brain activation in healthy older adults. Data from 25 older adults aged 64–77 years (13 in the training group and 12 in the comparison group) were analyzed. The training group completed 24 sessions of cognitive control training over eight weeks, while both groups underwent neuropsychological assessments and fMRI scans before and after the training period. Compared to the comparison group, the training group demonstrated decreased connectivity within the sensorimotor network during the resting state and increased connectivity within the default mode network during the cognitive control task. Moreover, these changes in functional connectivity were associated with improvements in cognitive control performance. The implications of these findings are discussed, along with suggestions for future studies.

Keywords: Computerized cognitive training, executive function, Default Mode network, fMRI

1차원고접수: 25.02.26; 수정본접수: 25.04.22; 최종게재결정: 25.04.30



Copyright: © 2025 The Korean Society for Cognitive and Biological Psychology. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided that the article is properly cited and the use is non-commercial.

인간의 뇌는 일생 동안 환경과 경험의 영향을 받아 변화할 수 있는 가소성을 지니고 있다. 이러한 특성에 기반하여, 노화나 퇴행성 신경질환으로 인한 신경인지 기능의 감퇴를 완화하거나 예방하는 방법으로서 인지훈련의 효과를 살펴보는 연구들이 지난 20여 년간 활발하게 진행되어 왔다(Katz, Shah, & Meyer, 2018). 여러 연구들에서 집중적인 인지훈련이 인지기능의 향상을 가져올 뿐만 아니라 뇌 기능의 변화를 가져올 가능성이 있음이 밝혀졌지만, 이러한 변화가 구체적으로 어떤 방식으로 일어나는지는 아직 명확하게 규명되지

않았다(van Balkom, van den Heuvel, Berendse, van der Werf, & Vriend, 2020).

특히 노년기 인지기능 저하를 예방하기 위한 인지훈련 연구에서는 노화에 가장 취약한 것으로 알려진 인지통제 기능에 대한 훈련 효과가 경험적으로 가장 잘 입증되고 있다(Buitenweg, Murre, & Ridderinkhof, 2012; Karbach & Verhaeghen, 2014; Nguyen, Murphy, & Andrews, 2019). 인지통제 기능은 과제 목표에 따라 적절한 정보처리를 강화하고, 방해되는 정보를 억제시켜 인지적 효율성을 높이는 영

* 이 논문은 LG 연합문화재단의 지원을 받아 수행된 연구임.

† 교신저자: 최진영, 서울대학교 심리학과, (08826) 서울특별시 관악구 관악로 1, E-mail: jychey@jbnu.ac.kr

역-일반적(domain-general) 기능이다(MacDonald, Cohen, Stenger, & Carter, 2000). 인지통제 기능은 전전두엽과 두정엽 영역들로 구성된 전두-두정 네트워크(frontoparietal network, FPN)를 주요 신경 기반으로 작동한다(Niendam, Laird, Ray, Dean, Glahn, & Carter, 2012). Kim, Chey와 Lee(2017)는 지역사회에서 독립적으로 생활하고 있는 국내 노인들을 대상으로 2개월 동안 집중적인 인지통제 훈련을 실시하고, 인지훈련이 인지기능과 뇌 기능에 미치는 효과를 확인한 바 있다. 이 연구에서 훈련집단은 비교집단에 비해 인지통제 기능과 재인기억에서 유의하게 더 큰 향상을 보였을 뿐만 아니라, 한국판 치매평가도구(Korean Dementia Rating Scale-2, K-DRS-2; Chey, 2011)로 측정한 전반적 인지기능에서도 더 큰 향상을 보였다. 또한 훈련집단은 훈련 후에 인지통제 과제 수행 중의 활성화가 우측 전두두정 영역들과 좌측 전방 뇌섬엽에서 증가하였고, 이러한 변화는 인지통제 수행의 향상과 관련되었다. 이는 인지통제 훈련이 노인들의 뇌 네트워크를 보다 효율적으로 변화시켰을 가능성을 시사한다. 본 연구는 Kim et al.(2017)의 연구 표본에서 수집된 기능적 뇌 영상자료를 분석하여 인지통제 훈련이 건강한 노인의 뇌 연결성에 미치는 효과를 살펴보고, 훈련에 따른 연결성의 변화와 인지통제 기능의 변화 간의 관계를 탐색하고자 한다.

인간의 뇌는 각 기능에 따라 고도로 전문화되어 있으면서도 긴밀하게 통합된 네트워크를 통해 효율적으로 정보처리를 수행한다(Sporns, 2013). 뇌 네트워크를 구성하는 하위 네트워크는 내부적으로 긴밀하게 연결되어 있으면서 다른 하위 네트워크와도 적절한 수준의 연결을 형성하여 상황에 따라 기능적 연결성을 유동적으로 재구성(reconfiguration)할 수 있다(Cohen & D'Esposito, 2016). 즉, 당면한 과제의 필요에 따라서 여러 네트워크가 함께 작동하거나 특정 네트워크가 선택적으로 활성화되며, 때로는 불필요한 네트워크를 억제함으로써 신경 자원을 효율적으로 사용한다.

기능적 네트워크(functional network)는 뇌 영역들이 함께 활성화되는 패턴을 바탕으로 정의되는데, 신경신호의 시간적 변동(temporal signal) 간의 상관관계, 즉 기능적 연결성(functional connectivity)을 통해 추정된다(Shen, 2015). 연구마다 하위 네트워크를 정의하는 구체적인 방식에는 차이가 있지만, 상당히 일관되게 보고되는 구조가 있다(Fox, Snyder, Vincent, Corbetta, Van Essen, & Raichle, 2005; Power et al., 2011; Yeo et al., 2011). Yeo et al. (2011)은 휴지 상태(resting-state) 기능적 자기공명영상(functional magnetic resonance imaging, fMRI) 자료를 분석하여 인간

신피질을 7개의 주요 네트워크로 구분하였고, 이 구분은 기능적 네트워크 연구에서 널리 활용되고 있다. 이 네트워크들의 주요 특징은 다음과 같다. 먼저 기본 모드 네트워크(default mode network, DMN)는 내측 전전두피질(medial prefrontal cortex), 후대상 피질(posterior cingulate cortex)을 핵심 영역으로 포함한다. 이 네트워크는 내부로 향한 처리 과정 중에 활성화되고 외부 자극을 처리하는 인지과제를 수행하는 중에는 억제되어 과제 비활성화 네트워크(task-negative network)로도 불린다. DMN의 신호는 전형적으로 과제 활성화 네트워크(task-positive network)의 신호와는 반상관(anti-correlation)의 관계를 가지며(Fox et al., 2005), 기억의 통합, 자기-모니터링, 마음이론 등 내적 처리 과정과 관련된다(Burianova, McIntosh & Grady, 2010; Jeong, Chung, & Kim, 2015; Spreng, Mar, & Kim, 2009). 인지통제의 주요 신경기반이기도 한 FPN은 배외측 전전두 피질(dorsolateral prefrontal cortex), 후두정 피질(posterior parietal cortex)을 주요 영역으로 한다. 이 네트워크는 작업기억, 계획, 판단과 의사 결정을 요하는 다양한 목표지향적 인지과제 수행에 관여하여(Kelly, Uddin, Biswall, Castellanos, & Milham, 2008; Menon, 2011) 중앙 집행 네트워크(central executive network)로도 불린다. 주의통제에 관여하는 네트워크로는 배측 주의 네트워크(dorsal attention network, DAN)와 복측 주의 네트워크(ventral attention network, VAN)가 있다. DAN은 전두 안구운동영역(frontal eye field)과 두정간구(intraparietal sulcus)를 포함하는 네트워크로 주의적인 하향 주의통제에 관여한다(Corbetta, Kincade, Ollinger, McAvoy & Shulman, 2000; Fox, Corbetta, Snyder, Vincent, & Raichle, 2006). VAN은 전측 뇌섬(anterior insular)과 배측 전대상 피질(dorsal anterior cingulate cortex)을 주요 영역으로 하고 자극-주도적인 상향 주의를 통제하는 네트워크이며(Corbetta et al., 2000; Fox et al., 2006), 현저성 네트워크(saliency network)로도 불리운다. 이외에도 안와전두 피질(orbitofrontal cortex)과 하측두엽(inferior temporal lobe)을 주요 영역으로 포함하며 정서처리에 관여하는 변연 네트워크(limbic network, LN), 두정엽의 체감각 영역과 전두엽의 운동 영역을 주요 영역으로 하는 체운동 네트워크(somatomotor network, SMN), 후두엽을 중심으로 한 시각 네트워크(visual network, VN)가 포함된다.

뇌 네트워크의 기능적 연결성은 성인 초기에 완성된 후, 중년기(40-50대)까지 비교적 안정적으로 유지되다가 노년기로 가면서 변화를 보인다(Deery, Di Paolo, Moran, Egan,

& Jamadar, 2023; Edde, Leroux, Altena, & Chanraud, 2021). 노년기에는 전반적으로 하위 네트워크 내부의 기능적 연결성(within connectivity)은 감소하는 반면, 네트워크 간의 기능적 연결성(between connectivity)은 증가하는 경향이 나타난다(Deery et al., 2023; Edde et al., 2021). 이러한 변화는 네트워크의 기능적 분리를 감소시키며, 결과적으로 탈분화(dedifferentiation)를 초래할 수 있다. 탈분화는 신경 효율성을 저하시키고 인지감퇴와 밀접한 관련되는 것으로 보인다(Deery et al., 2023; Edde et al., 2021; Spreng & Turner, 2019).

세부적으로 살펴보면, 노화가 기능적 연결성에 미치는 영향은 하위 네트워크에 따라 다르다(Deery et al., 2023; Edde et al., 2021). 연령이 증가함에 따라 DMN, FPN, DAN, VAN과 같이 고위 인지기능에 관여하는 연합피질 네트워크 내의 기능적 연결성은 감소하지만, SMN, VN, 청각 네트워크와 같이 기초적인 기능에 관여하는 감각운동 네트워크(sensorimotor networks)와 정서 네트워크는 네트워크 내의 연결성이 변하지 않거나 오히려 증가하는 경향을 보인다. 또한 고위 인지 네트워크들 간의 상호 연결성은 증가하는데, DMN과 다른 고위 인지 네트워크 간에서는 반상관(anti-correlation)이 감소하는 방식으로 나타난다. 또한 기본적인 감각운동 네트워크들은 DMN, FPN과의 연결성은 강화되지만, 주의 네트워크와의 연결성은 약화되는 경향이 있다. 이러한 양상을 반영하듯이 노화가 진행되어 감에 따라 연결의 국소적 효율성(local efficiency)도 고위 인지 네트워크들에서는 감소하고, 감각운동 네트워크에서는 오히려 증가하는 경향을 보인다(Deery et al., 2023).

한편 반복적인 인지훈련이나 인지적 자극이 풍부한 생활 양식은 노인들의 인지기능에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 확인되는데(Livingston et al., 2020), 이는 활발한 인지적 자극이 그와 관련된 네트워크를 반복적으로 활성화시킴으로써 네트워크의 기능적 연결성을 변화시키기 때문으로 보인다. Ross 등(2019)의 처리속도 및 주의력 훈련 연구에서 훈련을 받은 노인들은 시각 처리속도 및 주의 과제를 수행하는 동안 뇌섬과 보조운동 영역에서 활성화가 감소하였으며, 해당 과제와 관련된 여러 영역들 사이의 휴지 상태 기능적 연결성이 증가하였다. 작업기억 증진 효과가 확인된 작업기억 및 전환 훈련 연구(Lebedev et al., 2018)에서는 작업기억 과제와 시공간 추론과제 수행 중의 fMRI 자료에서 인지훈련 후 FPN과 DMN 간, FPN과 감각운동 네트워크 간의 연결성이 감소하고, 네트워크의 전반적 분리지표인 전뇌 모듈성(whole-brain modularity)이 증가하는 것으로 나타났다. 건

강한 노인들을 대상으로 다양한 인지영역을 훈련시킨 연구에서도 인지훈련은 인지기능을 향상시킬 뿐만 아니라 뇌의 기능적 연결성을 변화시키는 것으로 나타났다(Cao et al., 2016; Li et al., 2016). 기억, 추론, 문제해결, 시공간 능력 등의 고위 인지기능을 포함한 다영역 인지훈련이 휴지 상태 네트워크의 기능적 연결성에 미치는 영향을 살펴본 연구에서(Cao et al., 2016), 비교집단은 DMN 내 연결성과 FPN 내 연결성이 감소하는 경향을 보인 데 비해, 훈련집단은 이 연결성이 유지되거나 증가하는 경향을 보였고, 특히 FPN 내의 우측 배외측 전전두 피질과 상전두회(superior frontal gyrus) 간 연결성 증가가 클수록 인지기능도 더 크게 향상되었다. 또한 네트워크 간 연결성 분석에서 DMN과 FPN 영역들간의 반상관이 비교집단에서는 감소했지만 훈련집단에서는 유지되거나 증가하였다. 같은 연구 그룹의 또 다른 연구(Li et al., 2016)에서는 다영역 인지훈련이 노화에 따라 전형적으로 나타나는 기능적 연결성의 변화를 완화시키는 것으로 나타났다. 이러한 연구들은 집중적인 인지훈련이 두뇌 노화 과정에서 나타나는 네트워크 연결성의 부정적 변화를 지연시키거나 개선시킴으로써 인지노화를 감소시킬 수 있음을 시사한다.

인지통제 훈련 후 인지기능 향상과 함께 인지통제 관련 뇌 활성화의 변화가 관찰되었던 Kim et al.(2017)의 연구에서도 인지훈련은 뇌 네트워크의 기능적 연결성에 영향을 미쳤을 것으로 보인다. 노화에 취약한 인지통제 기능을 집중적으로 훈련시키는 것은 그 기능과 관련된 네트워크를 반복해서 활성화시킴으로써 노화에 따른 기능적 연결성의 변화를 완화시킬 가능성이 있다. 이에 본 연구에서는 Kim et al.(2017)의 연구 표본에서 휴지 상태와 인지통제 과제 수행 중에 수집된 fMRI 자료를 이용하여 인지통제 훈련이 노인 뇌 네트워크의 기능적 연결성에 미친 영향을 확인하고, 인지통제 수행과의 관계를 밝히고자 하였다. 뇌의 기능적 연결성은 구조적 연결성을 기반으로 하므로 휴지 상태와 과제 수행 중의 기능적 네트워크는 상당 부분 중첩되지만, 휴지 상태에서 발생하는 심리적 과정은 과제 수행 중 심리적 과정과는 차이가 있으므로 뇌 활성화의 상관 패턴에도 차이가 발생한다(Elton & Gao, 2015). 일반적으로 개인마다 무선적으로 다양한 심리과정이 진행되는 휴지 상태는 주어진 과제의 목표를 중심으로 관련 네트워크들이 함께 작동하는 과제 수행 중 보다 하위 네트워크의 모듈성이 잘 유지되는 경향이 있다(Finc et al., 2020; Jordan et al., 2021; Lebedev, Nilsson, & Lovden, 2018). 본 연구에서는 인지기능에 중요한 영역들을 포괄적으로 포함시키기 위해 다양한 과제 관련 fMRI 연구들을 메타 분석하여 정의한 Power 등(2011)의 기능적

노드를 연결성 분석의 기본단위인 관심 영역(region of interest, ROI)으로 정하고, 휴지 상태 fMRI 자료에서 추출된 Yeo et al. (2011)의 7개 네트워크로 이 영역들을 사전에 구분하여(부록 2) 네트워크 수준과 ROI 수준에서 기능적 연결성의 변화를 분석하였다.

방 법

연구 대상자 및 절차

Kim 등(2017)의 연구에 참여한 정신과 및 신경과적 문제가 없고, 감각기능 장애가 없는 오른손잡이 건강한 노인(64-77세) 27명 중에 MRI 자료에서 전체 대뇌가 포함되지 않은 1명, fMRI 촬영 시, 과제 지시를 잘못 이해하고 수행한 1명이 각 집단에서 제외되어 25명의 자료가 본 연구에서 분석되었다(훈련집단 13명, 비교집단 12명). 인지통제 훈련집단은 서울대학교 심리학 실험실에 방문하여 주 3회(회당 1시간)씩 총 8주간 전산화된 인지통제 훈련을 받았다. 인지통제 훈련은 억제, 주의전환, 정보업데이트, 이중과제 수행 등 인지통제의 하위 요소가 요구되는 5개 과제로 진행되었으며, 각 과제는 난이도에 따라 여러 수준으로 구성되었다. 훈련은 사전에 계획된 과제순서에 따라 각 과제의 낮은 난이도 수준부터 진행되었으며, 개별 노인들의 수행 수준에 따라 과제 난이도 수준은 조정되었다. 훈련과제에 대한 구체적인 기술은 부록 1에 제시하였다. 훈련 전과 후(사전, 사후)에 신경심리검사를 실시하고, 휴지 상태 및 인지통제 과제 수행 중 fMRI 자료를 수집하였다. 비교집단은 아무런 처치를 받지 않았으며, 훈련집단과 동등한 간격으로 동일한 신경심리검사와 fMRI 자료가 반복 수집되었다. 두 집단의 인지기능 사전 동질성은 K-DRS-2 총점으로 확인하였다. 이 연구는 서울대학교 생명윤리위원회의 승인 하에 수행되었으며, 모든 참여자는 연구 참여 전에 연구에 대한 설명을 듣고 서면동의서에 서명하였다.

인지통제 검사

본 연구에서는 인지통제 훈련에 따른 인지통제 기능의 변화와 기능적 연결성 변화 간의 관계를 탐색하기 위하여 인지통제 기능의 검사로 색 선로 검사(Color Trails Test, CTT; D'Elia et al., 1996)와 한국판 Stroop 검사(Stroop; Shin & Park, 2007)를 사용하였다. CTT는 한 페이지에 흩어져 있는 분홍색 원과 노란색 원을 원 안에 적혀있는 숫자의 순서대로 빠르고 정확하게 연결해야 하는 CTT1, 동일한 숫자가 분홍색 원, 노란색 원에 모두 적혀있고, 색을 교대로 바꾸면서

숫자 순서대로 연결해야 하는 CTT2로 구성되어 있다. CTT1은 주의력과 정신운동협응 능력을 요하는 데 비해, CTT2는 추가로 주의를 전환하는 인지적 유연성을 필요로 하는 과제이다. CTT의 측정치는 각 과제를 완료하는 데 소요되는 수행시간이다. Stroop은 검정색으로 인쇄된 색상 단어를 읽는 단어읽기(word reading), 다양한 색상으로 제시된 'XXXX'의 잉크 색상을 명명하는 색 명명(color naming), 적혀있는 색상 단어와 불일치하는 잉크 색상을 명명(e.g. 빨간색으로 적혀있는 '파랑'이라는 단어는 '빨강'으로 반응)해야 하는 색상-단어 간섭과제(color-word interference, CW)로 구성된다. Stroop의 세 과제는 공통적으로 주의력과 언어 기능을 필요로 하지만, 색상-단어 간섭과제는 이에 더하여 억제적 통제 능력을 요한다. Stroop의 각 과제는 20행 5열로 나열된 100문항으로 구성되며, 제한 시간 45초 동안 반응한 정반응의 개수로 측정한다. 본 연구에서는 인지통제 기능을 반영하는 CTT2의 수행시간(초)과 Stroop CW의 정반응 개수를 인지통제 기능의 측정치로 사용하였다. Kim et al. (2017)의 연구에서 인지통제 훈련은 CTT2와 Stroop CW의 수행향상과 관련되었다.

기능적 뇌영상 자료 수집

뇌 영상 자료는 3T MRI 장비(MAGNETOM Trio; Siemens, Germany)를 이용하여 획득하였다. 먼저 뇌의 구조적 이상을 확인하고 fMRI 영상의 전처리에 이용하기 위해 구조적 MRI 영상(TR = 1900 ms, TE = 2.36 ms, FOV = 256x256 mm², FA = 9°, voxel size = 1x1x1 mm³)을 촬영하였다. fMRI 스캔의 주요 파라미터들은 다음과 같다: TR = 2000 ms, TE = 30 ms, FOV = 240x240 mm², FA = 79°, voxel size = 3x3x3 mm³. 횡단면 간격 = 1 mm, 횡단면 수 = 30. fMRI 촬영 초기 장비의 신호 불안정성의 영향을 제거하기 위해, 자기장이 평형상태에 도달하기까지 처음 6초간은 데미 스캔을 했다. 기능적 뇌 영상 자료는 전체 대뇌를 포함하는 범위에서 획득되었다.

휴지 상태 fMRI 자료는 검은 바탕 위에 흰색 글씨로 '눈을 뜨고 편히 쉬고 계세요'라는 문구를 화면에 제시하고, 아무것도 하지 않고 편안히 쉬고 있는 상태에서 8분 동안 수집하였다. 인지통제 과제 관련 fMRI 촬영 시에는 인지통제 과제로 다중간섭과제(Multisource Interference Task, MSIT; Bush & Shin, 2006)를 이용하였다(Figure 1). MSIT는 숫자 0, 1, 2, 3 중 두 가지 숫자의 조합으로 화면에 제시된 세 개의 숫자들 중 '다른 한 숫자(e.g. 2-3-3에서 2)'를 가능한 빠르고 정확하게 보고해야 하는 과제이다. 참여자의 오른손

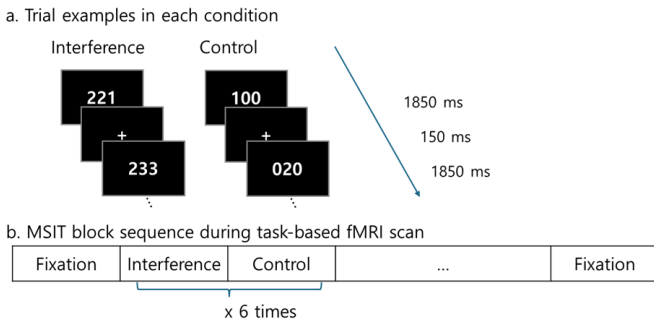


Figure 1. Experimental paradigm during task-based functional magnetic resonance imaging acquisition

아래 반응버튼 박스를 두고 각 숫자에 해당하는 버튼을 감지(1), 중지(2), 약지(3)로 눌러 보고하도록 하였다. 이 과정은 통제조건(control condition)과 간섭조건(interference)으로 구성되며, 통제조건은 '1-0-0', '0-2-0', '0-0-3' 중 하나가 제시되어 정답이 되는 '다른 한 숫자'의 위치가 해당 버튼의 위치와 항상 일치하고, 나머지 두 숫자는 반응 선택지(1, 2, 3)에 없는 0으로 고정하여 간섭을 최소화한 조건으로 주의력과 민첩한 운동기능이 요구된다. 간섭조건은 Simon 과제와 Flanker 과제를 결합한 형태로 '2-3-3'과 같이 세 숫자 중 반응 표적인 '다른 한 숫자'의 위치가 반응해야 하는 버튼의 위치와 불일치하고(Simon 효과), 반응 표적이 아닌 나머지 두 개의 숫자도 반응 선택지 중 한 숫자로 제시되어(Flanker 효과) 이중으로 간섭이 초래되는 조건이다. 간섭조건에서 정확히 반응하려면 '표적 숫자의 위치'와 '비표적 숫자'의 간섭을 해소하여 부정확한 반응을 억제해야 하므로 주의력, 운동기능과 함께 보다 적극적인 인지통제가 필요하다. 숫자 자극은 Bush와 Shin (2006)의 과제와 동일하게 2000 ms 마다 제시되었는데, Bush와 Shin은 250 ms 동안 제시했으나 본 연구에서는 노인들의 느린 처리속도를 고려하여 1850 ms 동안 제시하였고, 시행 간 응시점(+)은 150 ms 동안만 제시하였다. MSIT 수행 중 fMRI 촬영은 각 5분 36초씩 총 3회에 걸쳐 이뤄졌고, 각 촬영 회기의 시작과 끝에 24초의 초점 응시 블록이 배치되었다. 처음과 마지막의 초점 응시 블록 사이에는 블록 당 12 시행으로 구성된 통제조건과 간섭조건이 교대로 6회 반복되었다.

기능적 뇌영상 자료 분석

자료 분석에는 SPSS 21(SPSS Inc., Chicago, IL, USA), SPM 12(Wellcome Department of Cognitive Neurology, Institute of Neurology, London, UK), CONN 22.a(Nieto-Castanon & Whitefield-Gabrieli, 2022)를 이용하였다.

뇌 영상 자료 전처리. 기능적 영상 자료는 CONN 22.a의 전처리 파이프라인을 사용하여, 촬영 중 머리의 움직임과 촬영 시간차를 보정하였고, 이상치를 검출하고 공간적 정규화와 공간 편평화가 진행되었다. 먼저 공간해상도가 좋은, 각 참여자의 구조적 영상자료인 T1 강조 영상을 표준 뇌 공간인 MNI (Montreal Neurological Institute) 152 공간에 정합시켜 공간 정규화(spatial normalization) 비선형 변환 함수를 얻고 이를 그 참여자의 기능적 영상 자료를 정규화하는데 사용하였다. 또한 이를 $3 \times 3 \times 3$ mm 크기의 부피소로 재추출한 후 6 mm FWHM 가우시안 커널을 이용하여 공간 편평화(spatial smoothing)하였다. 기능적 연결성 분석 전에 머리 움직임, 생리적 요인 등 신호잡음의 영향을 제거하기 위해, 먼저 백질과 뇌척수액 공간의 혈중산소수준의존(blood oxygen level dependent, BOLD) 신호에서 추출된 각각 5개 차원의 값, 기능적 영상의 움직임을 보정할 때 계산된 6개의 움직임 관련 모수와 1차 도함수, 각 기능적 영상 촬영 중 선형 경향성 2개 요소를 포함하여 각 ROI의 fMRI BOLD 신호를 선형 회귀분석 한 후, 그 잔차값을 기능적 연결성 분석에 사용하였다. 이때 대역 필터링(band pass filtering)을 이용하여 fMRI 시간적 신호(temporal signal) 주파수 대역 중 휴지 상태와 과제 관련 신호를 모두 잘 반영하는 것으로 알려진(Sun, Miller, & D'Esposito, 2007) $0.01 < f < .15$ 대역의 신호만을 분석하였다.

기능적 연결성 구성과 비교. 기능적 연결성 분석을 위해 뇌영역을 Power et al.(2011)의 264개 기능적 노드 중 대뇌 피질에 해당하는 243 영역(부록2)으로 구획화하였다. 각 영역의 MNI 좌표를 중심으로 반지름 3 mm의 구형 ROI를 설정하고 영역들의 평균 시계열 신호를 각 참여자에서 추출하여 이 신호들 간의 Fisher 변환된 이변량 상관 계수로 영역들 간 기능적 연결성을 계산하였다. 휴지 상태, MSIT의 통제조건, 간섭조건에 대한 상관행렬을 사전, 사후 시점 각각에 대해 구하여, 각 개인당 총 6개의 상관행렬을 얻었다. 먼저 두 집단의 기능적 연결성의 사전 동질성을 확인하기 위해 기저 시점에서의 휴지 상태 기능적 연결성과 MSIT 각 조건의 수행 중의 기능적 연결성 각각 비교하였다. 243개의 ROI를 Yeo et al., (2011)이 규명한 7개 네트워크(부록2: FPN, DAN, VAN, DMN, SMN, VN, LN)로 구분하여 집단(훈련, 비교)×시점(사전, 사후)의 혼합설계 다변량분산분석을 통해 하위 네트워크 간, 하위 네트워크 내 연결성의 변화에서 집단과 시점의 상호작용을 분석하였으며, 네트워크 수준

의 변화는 $p < .05$ 수준의 임계값으로 검정되었다. 그 다음으로 ROI 간 각 연결(29,403개)에서 훈련 전과 후의 연결성 변화 (사전-사후 대비 = [-1, 1])의 집단 차이(훈련집단-비교집단 대비 = [1, -1])를 확인하였으며, ROI 수준의 변화는 $p < .001$ 수준의 임계값으로 검정되었다. 본 연구는 다수의 ROI와 네트워크 간 기능적 연결성 변화를 비교한 탐색적 연구로서 다중비교를 교정하면 지나치게 기준이 엄격해져 약 10 주의 사전-사후 검사 간격 동안 발생할 수 있는 미세한 연결성 변화를 포착하기 어려워 다중비교 문제는 통제하지 않았다.

기능적 연결성의 변화와 인지통제 기능의 변화 간의 관계

다음의 방법을 통해 기능적 연결성의 변화와 인지통제 기능의 변화 간의 관련성을 확인하였다. 기능적 연결성 분석에서 사전-사후 변화의 집단 차가 유의하였던 ROI 쌍들의 연결성 변화 정도(사후-사전)와 인지통제 기능을 측정하는 CTT2 수행시간, Stroop CW 정반응 개수의 변화량(사후-사전)을 계산하고, 연결성 변화 정도와 인지통제 검사 수행 변화량 간의 상관분석을 실시하였다.

결 과

훈련집단, 비교집단의 인구통계학적 특성과 인지기능의 사전 동질성

최종 분석에 포함된 25명의 인구통계학적 특성과 기저 시점

(사전)에서의 일반인지기능, 인지통제 기능은 Table 1에 제시한 바와 같다. 훈련집단의 평균 연령은 71.46세($SD = 4.08$), 평균 교육연한은 6.69년($SD = 3.99$)이었고, 비교집단의 평균 연령은 71.17세($SD = 3.32$), 평균 교육연한은 7.42년($SD = 4.06$)으로 두 집단의 연령 및 교육 수준의 차이는 유의하지 않았다($ps > .65$). 연구참여자의 성별은 훈련집단의 1명을 제외하고 모두 여성이었다. 기저 시점에서 두 집단은 전반적 인지기능 수준을 반영하는 K-DRS-2 총점($t(23) = -0.72, p = .48$), 인지통제 검사인 CTT2($t(23) = -0.63, p = .54$), Stroop CW($t(23) = 0.88, p = .39$)의 수행에서 모두 차이가 없었다. 사전-사후 검사 간격은 훈련집단의 평균 70.38일($SD = 4.59$), 비교집단의 평균 67.42일($SD = 3.18$)로 유의한 차이가 없었다 ($p = .075$).

기능적 연결성의 변화

먼저 사전 시점에서 243개의 ROI 수준과 7개 네트워크 수준에서의 기능적 연결성의 집단 차이를 분석한 결과는 다음과 같다. 휴지 상태의 기능적 연결성은 네트워크 수준에서 VN-DAN 간 연결성의 차이가 유의하였고($F(2,22) = 3.99, p = .024$), ROI 수준에서 VN의 우측 췌기소엽(cuneus)과 DAN의 좌측 하두정엽 간의 연결성에서 훈련집단에 비해 비교집단이 낮게 나타났다($t(23) = 4.06, p < .001$). MSIT 수행 중의 기능적 연결성은 간섭조건과 통제조건 모두에서 집단 차이가 유의하지 않았다. 네트워크 수준과 ROI 수준에서 기능적 연결성 변화의 집단 차이를 분석한 결과는 다음과 같다(Figure 2).

Table 1. Participant characteristics at baseline (N=25)

Variables	Training group (n=13)		Comparison group (n=12)	
	<i>M (SD)</i>		<i>M (SD)</i>	
Age (years)	71.46	(4.08)	71.17	(3.33)
Years of Formal Education	6.69	(3.99)	7.42	(4.06)
KDRS-2	130.62	(5.36)	128.83	(6.97)
CTT1	86.69	(29.07)	81.50	(57.44)
CTT2	202.00	(68.61)	179.25	(109.71)
Stroop W	64.62	(11.18)	64.25	(14.90)
Stroop C	42.33	(11.44)	42.33	(11.44)
Stroop CW	25.38	(7.29)	28.25	(8.95)

Note. K-DRS-2 = Korean Dementia Rating Scales-2 Total score, CTT1 = Color Trails Test 1 reaction time (seconds), CTT2 = Color Trails Test 2 reaction time (seconds), Stroop W = Stroop Word Reading correct response, Stroop C = Stroop Color Naming correct response, Stroop CW = Stroop Color-Word Interference correct response

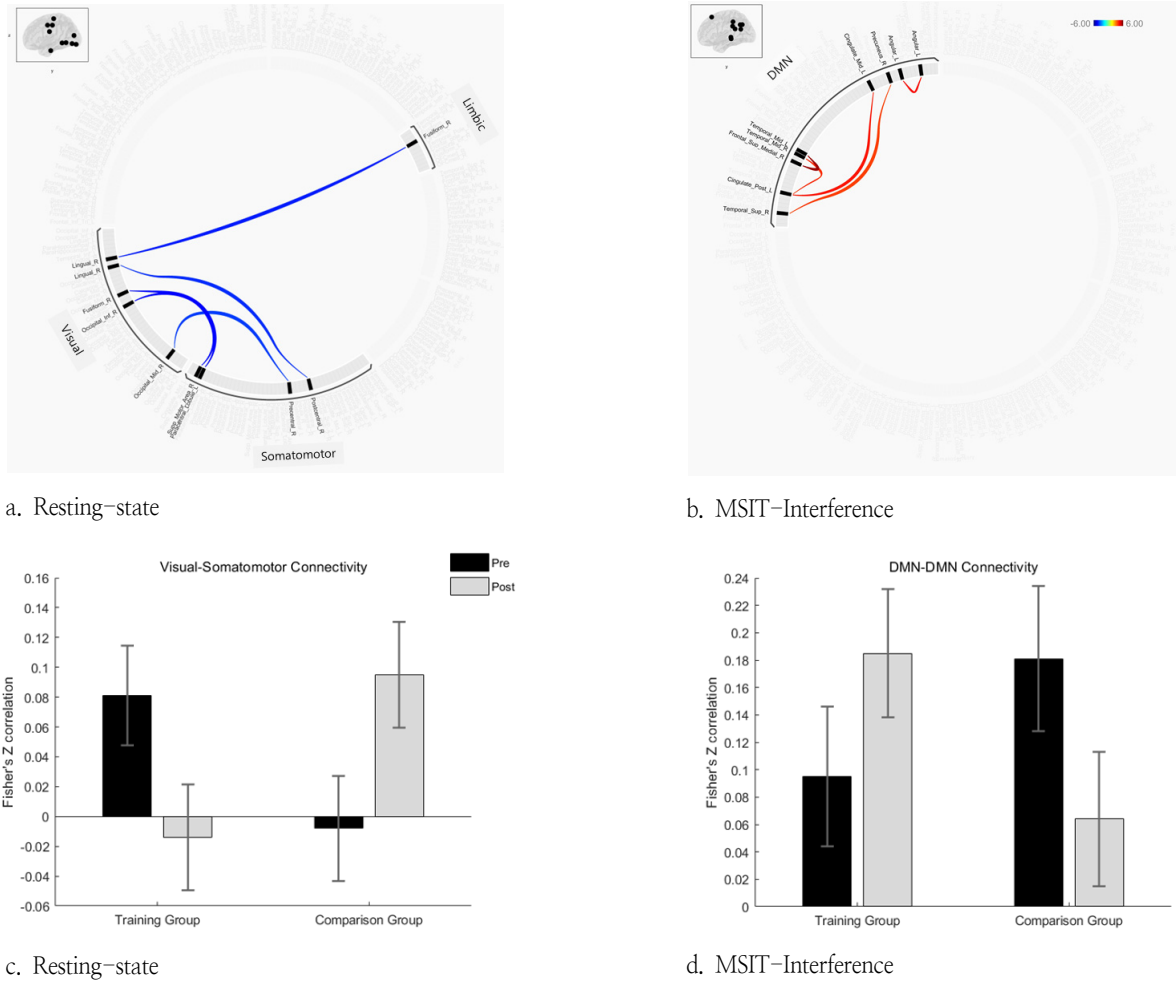


Figure 2. Training-related changes in functional connectivity during resting-state(a, c) and the Multisource Interference Task (MSIT; b, d). a, b: ROI connections showing significant differences in functional connectivity changes based on the group contrast (training, control [1, -1]) and time contrast (pre, post = [-1, 1]) ($p < .001$, uncorrected), during resting-state and MSIT performance, respectively. Lines are color-coded according to the color bars in the upper right corner. c: Comparison of mean functional connectivity between pre- and post-training scans in ROI pairs within the visual-sensorimotor network, where the group difference in resting-state connectivity change was significant. d: Comparison of mean functional connectivity between pre- and post-training scans in ROI pairs within the default mode network(DMN), where the group difference in task-related connectivity change during the MSIT was significant. Error bars represent 95% confidence intervals.

휴지 상태 기능적 연결성(resting-state functional connectivity). 혼합설계 다변량분석 결과, 네트워크 수준에서 집단(훈련, 비교)과 시점(사전, 사후)의 상호작용은 VN 내 연결성($F(2,22) = 3.99, p = .033$), VN-LN 간 연결성($F(2,22) = 3.96, p = .034$), VN-SMN 간 연결성($F(2,22) = 4.23, p = .028$)에서 유의하였다(Figure 2a). VN 내의 개별 ROI 간 연결에서는 사전에 설정한 $p < .001$ 에서는 상호작용이 유의한 연결은 없었으며, 상호작용의 방향성을 확인하기 위해 역치 수준을 $p < .005$ 로 완화하였을 때에는 양반구 후두엽에 위치한 VN의 일부 ROI들 간의 연결성이 훈련집단에서는 감소한 반면, 비교집단에서는 증가하는 양상을 보였다. VN-LN의 ROI들 간의 연결 중에는 VN의 우측 설회(lingual gyrus)와

LN의 우측 방추회(fusiform gyrus)의 연결성에서 사전-사후 변화량의 집단 차이가 유의하였고($t(23) = -4.17, p < .001$), 훈련집단의 연결성은 감소하는 반면, 비교집단의 연결성은 증가하였다. VN-SMN의 ROI들 간 연결 중에는 우측 하후두회(inferior occipital gyrus)와 좌측 근중심소엽(paracentral lobule), 우반구의 방추회와 보조운동영역(supplementary motor area), 설회와 중심후회(postcentral gyrus), 중후두회(middle occipital gyrus)와 전중심회(precentral gyrus) 간의 연결성에서 사전-사후 변화량의 집단 차가 유의하였다($p < .001$). 각 집단별 사전-사후 연결성 비교하면(Figure 2c), 위에 제시한 VN-SMN 간 모든 ROI 연결에서 비교집단은 유의하게 연결성이 증가하였다($p < .012$). 그에 비해 훈련집

단에서는 그 연결성이 모두 감소하였는데, 우반구 설회와 중 심후회 간의 연결성 감소는 유의한 수준에는 못 미쳤다(우반 구 설회-중심후회 $p = .147$, 그 외 $ps < .022$).

MSIT 수행 중 기능적 연결성(MSIT-related functional connectivity). 먼저 사전 시점에서 MSIT 통제조건과 간섭 조건의 반응시간 및 정확도에서 집단 간 차이는 유의하지 않았다($ps > .10$). 또한 사전-사후 변화량은 통제조건과 간섭 조건의 반응시간, 정확률, 그리고 두 조건의 반응시간과 정 확률을 각각 이용하여 산출한 간섭지수([간섭조건-통제조 건]÷통제조건)에서 모두 유의한 집단 차가 없었다($ps > .09$). 다만 각 집단 별로 사전-사후 수행을 비교하면, 훈련 집단에서는 반응시간과 정확률 모두에서 간섭지수가 유의하 게 감소하였으나($ps < .05$), 비교집단에서는 유의한 변화가 나타나지 않았다. 각 시점에서 두 집단의 MSIT 수행 결과는 Kim et al. (2017)에 구체적으로 제시되었다.

MSIT의 통제조건에서 기능적 연결성은 네트워크와 ROI 수준에서 모두 사전-사후 변화량의 집단 차가 유의하지 않 았다. 간섭조건의 기능적 연결성에서는 네트워크 수준(Figure 2b)에서 DMN 내의 연결성에서만 집단×시점의 상호작용이 유의하였다($F(2,22) = 4.85, p = .018$). ROI들 간 연결 수 준에서는 DMN 내의 좌측 각회(angular gyrus)의 영역들간, 좌측 중측두회(middle temporal gyrus)와 우반구의 내측 상 전두회(medial superior frontal gyrus)간 연결성의 변화에서 집단 간 차이가 유의하였다. 또한 좌측 후대상회(posterior cingulate)는 좌측 중대상회(midcingulate), 우측 중측두회 (middle temporal gyrus), 우측 췌기앞소엽(precuneus)과의 연결성 변화에서 집단 차를 보였다. 이상의 DMN 내 영역 들 사이의 연결성이 훈련집단에서는 증가하였지만, 비교집단 에서는 감소하였다(Figure 2d). 단, 각 집단별 사전-사후 연 결성을 비교하면, 비교집단에서 우측 중측두회와 좌측 후대 상회의 연결성 감소는 유의수준에 못 미쳤다($p = .076$).

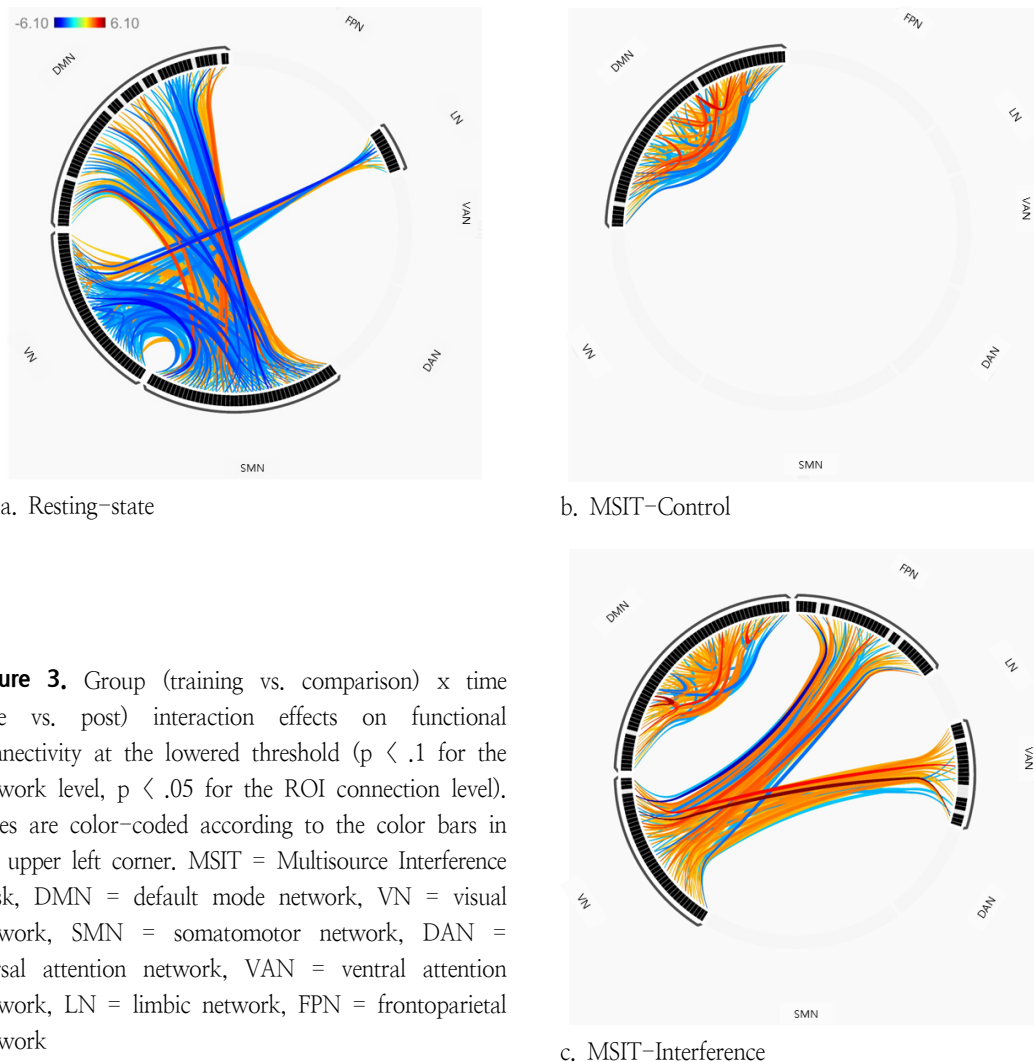


Figure 3. Group (training vs. comparison) x time (pre vs. post) interaction effects on functional connectivity at the lowered threshold ($p < .1$ for the network level, $p < .05$ for the ROI connection level). Lines are color-coded according to the color bars in the upper left corner. MSIT = Multisource Interference Task, DMN = default mode network, VN = visual network, SMN = somatomotor network, DAN = dorsal attention network, VAN = ventral attention network, LN = limbic network, FPN = frontoparietal network

Table 2. Correlations between changes in cognitive control and changes in functional connectivity

Networks	ROIs	Δ CTT2		Δ Stroop CW		
		<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	
Resting-State	VN-LN	R Lingual - R Fusiform	.36	.074	-.23	.267
	VN-SMN	R Inferior Occipital -L Paracentral	.08	.703	-.25	.226
		R Fusiform - R Supplementary Motor	.06	.767	-.36	.073
		R Lingual - R Postcentral	.30	.141	-.17	.427
		R Middle Occipital - R Precentral	-.01	.949	-.21	.315
MSIT	DMN-DMN	L Middle Temporal - R Medial Superior Frontal	-.16	.443	.27	.196
		L Angular - L Angular	-.19	.372	.35	.087
		L Posterior Cingulate - L Midcingulate	-.03	.903	.18	.393
		L Posterior Cingulate - R Middle Temporal	-.39	.057	.46	.020
		L Posterior Cingulate - R Precuneus	-.17	.409	.33	.106

Note. ROI = region of interest, R = right, L = left, CTT2 = Color Trails Test 2 reaction time (seconds), Stroop CW = Stroop Color-Word Interference correct responses, MSIT = Multisource Interference Task, VN = visual network, LN = limbic network, SMN = somatomotor network, DMN = default mode network

기능적 연결성의 변화와 인지통제기능 변화의 관계

휴지 상태와 MSIT 간섭조건 수행 중 사전-사후 연결성 변화(사후-사전)에서 집단 차이가 유의하였던 ROI 간 연결성의 변화(사후-사전)와 인지통제 검사인 CTT2, Stroop CW의 수행 변화(사후-사전) 간의 상관관계를 살펴보았다(Table 2). 그 결과, 휴지 상태에서 우반구의 설회와 방추회 간 연결성의 변화량은 CTT2 수행시간의 변화량과 정적 상관 경향성($r = .36, p = .074$)을, 우반구의 방추회와 보조운동영역 간 연결성의 변화량은 Stroop CW의 정반응 수 변화량과 부적 상관 경향성($r = -.36, p = .073$)을 보였다. MSIT의 간섭조건 수행 중의 좌측 후대상회와 우측 중측두회 간의 연

결성 변화는 CTT2의 수행시간 변화와 부적 상관 경향성($r = -.39, p = .057$)을 보였고, Stroop CW 정반응 수 변화와는 유의한 정적 상관을 보였다($r = .46, p = .020$). 또한, 간섭조건 수행 중 좌측 각회 하위 영역들 간의 연결성 변화도 Stroop CW 정반응 수의 변화와 정적 상관 경향성을 보였다($r = .35, p = .087$). 특히 MSIT 간섭조건 수행 중 기능적 연결성의 변화에서 집단 차가 유의하였던 DMN 영역들 간의 연결성 변화는 유의 확률은 다르지만 Stroop CW 정반응 수 변화와 일관되게 정적 관계를 보였고, 이들 연결성 변화의 평균은 Stroop CW 변화와 유의한 정적 상관을 보였다($r = .42, p = .037$; Figure 4).

논 의

본 연구에서는 인지통제 훈련이 건강한 노인의 뇌 기능적 연결성에 미치는 영향을 확인하고, 기능적 연결성의 변화가 인지통제 기능의 향상과 어떠한 관계가 있는지 확인하고자 하였다. 이를 위해 국내 노인들을 대상으로 인지기능 향상 및 인지통제 관련 뇌 활성화 증가 효과를 확인한 Kim et al. (2017)의 인지통제 훈련 효과 연구에서 수집된 휴지 상태 및 인지통제 과제(MSIT) 수행 중의 fMRI 자료를 이용하여 훈련에 따른 뇌의 기능적 연결성의 변화를 분석하였다. 연구 결과, 인지통제 훈련 후 휴지 상태에서 시각 네트워크(VN) 내의 연결성, 시각 네트워크와 체운동 네트워크(SMN), 시각 네트워크와 변연 네트워크(LN) 간의 연결성이 감소하였으며,

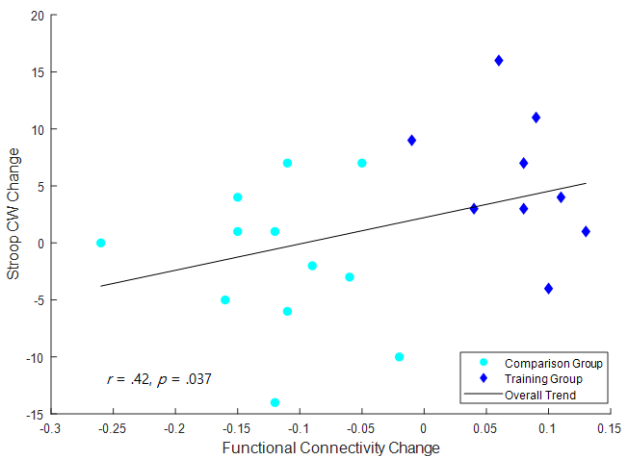


Figure 4. Correlation between the changes in Stroop Color-Word performance and changes in average functional connectivity of default mode network

인지통제 과제 수행 중에는 기본 모드 네트워크(DMN) 내의 연결성만 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 연결성의 변화는 인지통제 기능, 특히 억제적 통제 기능의 향상과 관련되었다.

인지통제 훈련을 받은 노인들은 비교집단의 노인들과 비교하여 훈련 후 휴지 상태에서 시각 네트워크 내의 연결성이 감소하였고, 시각 네트워크는 체운동 네트워크, 변연 네트워크와의 연결성에서도 모두 감소를 보였다. 유의성 판단 수준을 네트워크 수준 $p < .1$, ROI 간 개별 연결 수준 .05로 느슨하게 적용하여 휴지 상태 기능적 연결성의 포괄적인 변화양상을 탐색하면(Figure 3a), 위 결과 외에도 기본 모드 네트워크와 체운동 네트워크 간의 연결성 감소가 추가적으로 관찰되었다. 이는 모두 노화 과정에서 증가하는 것으로 알려진 연결성이며(Deery et al., 2023), 본 연구의 비교집단도 약 10주의 검사-재검사 기간 동안 이 연결성이 증가하는 양상을 보였다. ROI 수준의 탐색에서 시각 네트워크의 설회와의 연결성이 유의하게 감소하였던 변연 네트워크의 우측 방추회는 얼굴의 정서 재인에 중요한 영역이면서(Kawasaki et al., 2012), 설회와 함께 대상 재인에 관여하는 복측 시각 경로에도 포함된다. 고위 인지기능 네트워크를 구성하는 연합 피질은 구조적으로 노화에 취약하여 두뇌 노화가 진행됨에 따라 후기 노년기까지 비교적 잘 보존되는 감각운동 및 정서 네트워크 영역들(Spreng & Turner, 2019) 간의 연결성이 상대적으로 더 강화되는 것으로 보인다. 본 연구의 결과에서 집중적인 인지통제 훈련은 노화에 취약한 연합 피질을 강화하거나 감퇴를 지연시킴으로써 기초적인 기능인 감각운동 및 정서 관련 네트워크의 연결성이 상대적으로 강화되는 것을 지연시키거나 역전시킬 가능성이 있다.

또한 인지통제 훈련은 인지통제 과제 수행 중 기본 모드 네트워크 내의 연결성을 증가시키는 것으로 나타났다. 기본 모드 네트워크 내의 연결성은 휴지 상태(Andrews-Hanna et al., 2007; Geerilings, Renken, Saliassi, Maurits, & Lorist, 2015)와 과제 수행 중(Geerilings, Maurits, Renken, & Lorist, 2014; Grady et al., 2010) 모두에서 일관되게 노화에 따른 감소가 보고되었다. 본 연구에서도 추적 기간 동안 아무런 처치를 받지 않은 비교집단은 과제 수행 중 기본 모드 네트워크 내의 연결성이 감소하였다. 한 종단 연구에서 기본 모드 네트워크 내 연결성 감소는 70 대 이후 급격히 진행되며, 이는 노화에 취약한 일화 기억의 감퇴와 관련되었다(Staffaroni et al., 2018). 반면, 집중적인 인지훈련을 받은 노인들은 본 연구에서와 마찬가지로 이 네트워크의 연결성이 증가하는 경향을 보여(Cao et al., 2016), 인지훈련이 기본

모드 네트워크의 연결성 강화를 촉진할 수 있음이 시사된다. 기본 모드 네트워크는 저장된 지식 표상이나 경험에의 접근을 포함하여 내부를 향한 정보처리에 관여하는 네트워크이며, 외부로 향한 과제를 수행하는 중에는 전형적으로 억제되는 과제 비활성 시스템으로 제대로 억제되지 않으면 과제 수행에 방해가 될 수도 있다(Andrews-Hanna, Reidler, Sepulcre, Poulin, & Buckner, 2010; Sonoga-Barke & Castellanos, 2007). 과제 수행 중 기본 모드 네트워크의 억제는 노화에 따라 감소하는 데(Hansen et al., 2014; Persson, Lustig, Nelson, & Reuter-Lorenz, 2007), 기본 모드 네트워크의 연결성 감소가 이와 관련될 수 있다. 본 연구의 결과에서 반복적인 인지통제 훈련은 집중적인 인지통제가 필요한 상황에서 기본 모드 네트워크의 기능적 연결성을 강화함으로써 이 네트워크를 효과적으로 억제할 수 있게 하는 것으로 보인다. 인지통제 과제 수행 중 기본 모드 네트워크의 연결성 증가는 인지통제 기능에 긍정적으로 기여하는 것으로 보이는 데, 이 네트워크의 연결성이 더 많이 증가할수록 인지통제 검사의 수행이 더 크게 향상되었다. 다만, 본 연구에서 유의수준을 완화하여도 기본 모드 네트워크와 인지통제 관련 네트워크인 전두-두정 네트워크(FPN)를 포함한 과제 활성화 시스템들과 반상관(anti-correlation)의 강화가 직접적으로 확인되지는 않았다(Figure 3c). 추후 연구에서는 인지과제 수행 중 기본 모드 네트워크의 연결성과 과제 수행에 직접 관여하는 네트워크의 작동 간의 관계를 세부적으로 탐색함으로써 기본 모드 네트워크의 연결성이 인지기능에 기여하는 구체적인 방식을 규명할 필요가 있다.

본 연구의 결과는 인지통제 훈련이 노화에 따른 기능적 네트워크의 역기능적 변화를 지연시키거나 회복시키는 데 기여할 가능성을 시사한다. van Balkom et al. (2020)은 인지훈련 연구의 체계적 고찰을 통해, 인지훈련이 노화 및 퇴행성 신경질환과 관련된 연결성의 역기능적 변화를 완화할 수 있는 잠재성을 가진다고 주장한 바 있다. 본 연구에서도 변화의 집단 간 차이가 확인되었던 감각운동 및 정서 네트워크의 연결성과 기본 모드 네트워크의 연결성에서 비교집단은 기존의 노화 연구들에서 보고된 변화양상을 보인 반면, 훈련 집단은 이와 반대되는 변화를 보였다. 다만, 인지훈련에 따른 기능적 연결성의 변화가 휴지 상태와 과제 수행 시에 일관되게 나타나지 않고 서로 다른 네트워크에서 관찰되었다.

일반적으로 뇌의 기능적 네트워크는 과제 수행 중에도 그 구조가 상당 부분 유지되지만 하위 네트워크 간 연결성이 증가하여 모듈성이 감소하는 경향이 있다(Elton & Gao, 2015; Iordan et al., 2021; Lebedev et al., 2018). 특히 과

제의 난이도가 증가할 수록 이러한 경향은 더 두드러진다. 인지통제가 영역-일반적이고 목표지향적 처리 과정임을 감안할 때, 집중적인 인지통제 훈련은 과제 수행에 필요한 하위 네트워크 간에 통합을 촉진하여 네트워크 간 연결성이 증가할 것으로 예상해 볼 수 있다. 하지만 본 연구에서 네트워크 간 연결성의 변화는 휴지 상태에서 감각운동 네트워크에 해당하는 시각 네트워크와 체운동 네트워크 간의 연결성 감소로만 나타났을 뿐 과제 수행 중에는 관찰되지 않았다. 또한 인지통제의 핵심 네트워크라고 할 수 있는 전두-두정 네트워크의 연결성 변화도 나타나지 않았다. Kim 등(2017)의 연구에서는 본 연구와 동일한 과제 기반 fMRI 자료를 분석하여 인지통제 훈련 후 전두-두정 네트워크를 포함한 과제 활성화 영역이 더 넓게 확장됨을 발견한 바 있다. 인지통제 과제 수행 중 연결성의 변화가 기본 모드 네트워크 내 연결성 증가로만 나타난 본 연구의 결과는 Kim 등(2017)이 연구에서 관찰되었던 활성화 영역의 확장이 과제 활성화 시스템인 기본 모드 네트워크의 효과적인 억제와 관련될 가능성을 제기한다. 한편 집단과 시점의 상호작용 효과의 유의성을 네트워크 수준 .1, ROI 연결 수준에서 .05로 완화하여 적용하면, MSIT 간섭조건에서 과제 활성화 시스템에 해당하는 시각 네트워크와 전두-두정 네트워크(VN-FPN), 시각 네트워크와 복측 주의 네트워크(VN-VAN) 간의 연결성이 훈련 집단에서는 증가하는 경향이 관찰되었다(Figure 3). 따라서 본 연구의 표본 크기가 작아 네트워크 간 미세한 연결성 변화를 탐지하지 못했을 가능성도 배제할 수 없으며, 보다 큰 표본을 대상으로 한 후속 연구가 필요하다.

본 연구는 인지통제 훈련이 건강한 노인의 뇌 기능적 연결성에 미치는 영향을 탐색하고, 기능적 연결성의 변화가 인지통제 기능 향상과 관련됨을 확인하였다. 본 연구에서 나타난 훈련에 따른 기능적 연결성의 변화양상으로 보아 인지통제 훈련은 노화 과정에서 나타나는 기능적 네트워크의 변화를 완화함으로써 노인들의 인지기능에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 시사된다. 그러나 본 연구는 몇 가지 제한점을 가진다. 첫째, 연구 표본이 작고 여성 노인에 편향되어 있어 그 결과를 전체 노인으로 일반화하는 데 한계가 있다. Stumme et al. (2020)은 장노년 연구에서 휴지 상태 기능적 연결성이 일부 네트워크에서 성차가 있음을 발견하였다. 둘째, 본 연구는 훈련 전과 훈련 종료 직후의 변화를 비교한 연구로 훈련의 장기적인 효과를 검증하기에는 추적 기간(약 10 주)이 충분하지 않다. 후속 연구에서는 보다 장기적인 추적을 통해 인지훈련의 지속적인 효과를 검증할 필요가 있다.

셋째, 본 연구는 다수의 ROI 간 기능적 연결성을 비교한 탐색적 연구로서 다중비교 문제를 통제하지 않았다. 243개의 ROI 간 29,405 연결성, 7개의 네트워크 간 28 연결성을 비교하고 있어 다중비교를 교정하면 지나치게 기준이 엄격해져 유의한 영역을 찾을 수가 없었다. 각 네트워크의 주요 영역을 중심으로 한 씨드 기반(seed based) 연결성 분석이나 연구자료에 기반한 독립성분분석(independent component analysis)과 같은 다양한 분석 기법을 활용하여 본 연구의 주요 결과를 재확인할 필요가 있다. 이러한 제한점에도 불구하고, 본 연구는 인지통제 훈련이 노인의 기능적 연결성을 긍정적으로 변화시켜 노년기 인지감퇴를 예방하거나 완화하는데 기여할 가능성을 보여준다.

References

- Andrews-Hanna, J. R., Snyder, A. Z., Vincent, J. L., Lustig, C., Head, D., Raichle, M. E., & Buckner, R. L. (2007). Disruption of large-scale brain systems in advanced aging. *Neuron, 56*(5), 924-935. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2007.10.038>
- Andrews-Hanna, J. R., Reidler, J. S., Sepulcre, J., Poulin, R., & Buckner, R. L. (2010). Functional-Anatomic Fractionation of the Brain's Default Network. *Neuron, 65*(4), 550-562. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2010.02.005>
- Buitenweg, J. I., Murre, J. M., & Ridderinkhof, K. R. (2012). Brain training in progress: a review of trainability in healthy seniors. *Frontiers in Human Neuroscience, 6*, 183. <http://dx.doi.org/10.3389/fnhum.2012.00183>
- Burianova, H., McIntosh, A. R., & Grady, C. L. (2010). A common functional brain network for autobiographical, episodic, and semantic memory retrieval. *Neuroimage, 49*(1), 865-874. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.08.066>
- Bush, G., & Shin, L. M. (2006). The Multi-Source Interference Task: an fMRI task that reliably activates the cingulo-frontal-parietal cognitive/attention network. *Nature protocols, 1*(1), 308-313. <http://dx.doi.org/10.1038/nprot.2006.48>
- Cao, W., Cao, X., Hou, C., Li, T., Cheng, Y., Jiang, L., Luo, C., Li, C., & Yao, D. (2016). Effects of cognitive training on resting-state functional connectivity of default mode, salience, and central executive networks. *Frontiers in Aging Neuroscience, 8*, 70. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2016.00070>
- Chey, J. (2011). *Korean Dementia Rating Scale-2*. Seoul:

- Hakjisa.
- Corbetta, M., Kincade, J. M., Ollinger, J. M., McAvoy, M. P., & Shulman, G. L. (2000). Voluntary orienting is dissociated from target detection in human posterior parietal cortex. *Nature Neuroscience*, 3(3), 292-297. <https://doi.org/10.1038/73009>
- Cohen, J. R., & D'Esposito, M. (2016). The segregation and integration of distinct brain networks and their relationship to cognition. *The Journal of Neuroscience*, 36(48), 12083-12094. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2965-15.2016>
- D'Elia, L., Satz, P., Uchiyama, C., & White, T. (1996). *Color Trails Test professional manual*. Odesa, FL: Psychological Assessment resources.
- Deery, H. A., Di Paolo, R., Moran, C., Egan, G. F., & Jamadar, S. D. (2023). The older adult brain is less modular, more integrated, and less efficient at rest: A systematic review of large-scale resting-state functional brain networks in aging. *Psychophysiology*, 60(1), e14159. <https://doi.org/10.1111/psyp.14159>
- Edde, M., Leroux, G., Altena, E., & Chanraud, S. (2021). Functional brain connectivity changes across the human life span: From fetal development to old age. *Journal of neuroscience research*, 99(1), 236-262. <https://doi.org/10.1002/jnr.24669>
- Elton, A., & Gao, W. (2015). Task-positive Functional Connectivity of the Default Mode Network Transcends Task Domain. *Journal of cognitive neuroscience*, 27(12), 2369-2381. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00859
- Finc, K., Bonna, K., He, X., Lydon-Staley, D. M., Kühn, S., Duch, W., & Bassett, D. S. (2020). Dynamic reconfiguration of functional brain networks during working memory training. *Nature communications*, 11(1), 2435. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15631-z>
- Fox, M. D., Corbetta, M., Snyder, A. Z., Vincent, J. L., & Raichle, M. E. (2006). Spontaneous neuronal activity distinguishes human dorsal and ventral attention systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(26), 10046-10051. <https://doi.org/10.1073/pnas.0604187103>
- Fox, M. D., Snyder, A. Z., Vincent, J. L., Corbetta, M., Van Essen, D. C., & Raichle, M. E. (2005). The human brain is intrinsically organized into dynamic, anticorrelated functional networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(27), 9673-9678. <https://doi.org/10.1073/pnas.0504136102>
- Geerligs, L., Maurits, N. M., Renken, R. J., & Lorist, M. M. (2014). Reduced specificity of functional connectivity in the aging brain during task performance. *Human Brain Mapping*, 35(1), 319-330. <https://doi.org/10.1002/hbm.22175>
- Geerligs, L., Renken, R. J., Saliassi, E., Maurits, N. M., & Lorist, M. M. (2015). A brain-wide study of age-related changes in functional connectivity. *Cerebral Cortex*, 25(7), 1987-1999. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhu012>
- Grady, C. L., Protzner, A. B., Kovacevic, N., Strother, S. C., Afshin-Pour, B., Wojtowicz, M., Anderson, J. A., Churchill, N., & McIntosh, A. R. (2010). A multivariate analysis of age-related differences in default mode and task-positive networks across multiple cognitive domains. *Cerebral cortex* 20(6), 1432-1447. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhp207>
- Hansen, N. L., Lauritzen, M., Mortensen, E. L., Osler, M., Avlund, K., Fagerlund, B., & Rostrup, E. (2014). Subclinical cognitive decline in middle-age is associated with reduced task-induced deactivation of the brain's default mode network. *Human brain mapping*, 35(9), 4488-4498. <https://doi.org/10.1002/hbm.22489>
- Iordan, A. D., Moored, K. D., Katz, B., Cooke, K. A., Buschkuhl, M., Jaeggi, S. M., Polk, T. A., Peltier, S. J., Jonides, J., & Reuter-Lorenz, P. A. (2021). Age differences in functional network reconfiguration with working memory training. *Human brain mapping*, 42(6), 1888-1909. <https://doi.org/10.1002/hbm.25337>
- Jeong, W., Chung, C. K., & Kim, J. S. (2015). Episodic memory in aspects of large-scale brain networks. *Frontiers in human neuroscience*, 9, 454. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00454>
- Karbach, J. & Verhaeghen, P. (2014). Making working memory work: A meta-analysis of executive control and working memory training in older adults. *Psychological Science*, 25, 2027-2037. <http://dx.doi.org/10.1177/0956797614548725>
- Katz, B., Shah, P., & Meyer, D. E. (2018). How to play 20 questions with nature and lose: Reflections on 100 years of brain-training research. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(40), 9897-9904. <https://doi.org/10.1073/pnas.1617102114>
- Kawasaki, H., Tsuchiya, N., Kovach, C. K., Nourski, K. V., Oya, H., Howard, M. A., & Adolphs, R. (2012). Processing of facial emotion in the human fusiform gyrus. *Journal of*

- cognitive neuroscience*, 24(6), 1358-1370.
https://doi.org/10.1162/jocn_a_00175
- Kelly, A. M., Uddin, L. Q., Biswal, B. B., Castellanos, F. X., & Milham, M. P. (2008). Competition between functional brain networks mediates behavioral variability. *Neuroimage*, 39(1), 527-537.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.08.008>
- Menon, V. (2011). Large-scale brain networks and psychopathology: A unifying triple network model. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(10), 483-506.
<https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.08.003>
- Kim, H., Chey, J., & Lee, S. (2017). Effects of multicomponent training of cognitive control on cognitive function and brain activation in older adults. *Neuroscience Research*, 124, 8-15.
<https://doi.org/10.1016/j.neures.2017.05.004>
- Lebedev, A. V., Nilsson, J., & Lovden, M. (2018). Working memory and reasoning benefit from different modes of large-scale brain dynamics in healthy older adults. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 30(7), 1033-1046.
https://doi.org/10.1162/jocn_a_01260
- Li, T., Yao, Y., Cheng, Y., Xu, B., Cao, X., Waxman, D., Feng, W., Shen, Y., Li, Q., Wang, J., Wu, W., Li, C., & Feng, J. (2016). Cognitive training can reduce the rate of cognitive aging: A neuroimaging cohort study. *BMC Geriatrics*, 16, 12. <https://doi.org/10.1186/s12877-016-0194-5>
- Livingston, G., Huntley, J., Sommerlad, A., Ames, D., Ballard, C., Banerjee, S., Brayne, C., Burns, A., Cohen-Mansfield, J., Cooper, C., Costafreda, S. G., Dias, A., Fox, N., Gitlin, L. N., Howard, R., Kales, H. C., Kivimäki, M., Larson, E. B., Ogunniyi, A., Orgeta, V., ... Mukadam, N. (2020). Dementia prevention, intervention, and care: 2020 report of the Lancet Commission. *Lancet*, 396(10248), 413-446.
[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30367-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30367-6)
- MacDonald, A. W., Cohen, J. D., Stenger, V. A., & Carter, C. S. (2000). Dissociating the role of the dorsolateral prefrontal and anterior cingulate cortex in cognitive control. *Science*, 288, 1835-1838.
<http://dx.doi.org/10.1126/science.288.5472.1835>
- Nguyen, L., Murphy, K., & Andrews, G. (2019). Cognitive and neural plasticity in old age: A systematic review of evidence from executive functions cognitive training. *Ageing research reviews*, 53, 100912.
<https://doi.org/10.1016/j.arr.2019.100912>
- Niendam, T. A., Laird, A. R., Ray, K. L., Dean, Y. M., Glahn, D. C., & Carter, C. S. (2012). Meta-analytic evidence for a superordinate cognitive control network subserving diverse executive functions. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience*, 12(2), 241-268.
<http://dx.doi.org/10.3758/s13415-011-0083-5>
- Nieto-Castanon, A., & Whitfield-Gabrieli, S. (2022). CONN functional connectivity toolbox: RRID SCR_009550, release 22. Boston, MA. doi:10.56441/hilbertpress.
- Persson, J., Lustig, C., Nelson, J. K., & Reuter-Lorenz, P. A. (2007). Age differences in deactivation: a link to cognitive control? *Journal of cognitive neuroscience*, 19(6), 1021-1032. <https://doi.org/10.1162/jocn.2007.19.6.1021>
- Power, J. D., Cohen, A. L., Nelson, S. M., Wig, G. S., Barnes, K. A., Church, J. A., et al. (2011). Functional network organization of the human brain. *Neuron*, 72(4), 665-678.
<https://doi.org/10.1016/j.neuron.2011.09.006>
- Ross, L. A., Webb, C. E., Whitaker, C., Hicks, J. M., Schmidt, E. L., Samimy, S., et al. (2019). The effects of useful field of view training on brain activity and connectivity. *Journals of Gerontology. Series B, Psychological Sciences and Social Science*, 74(7), 1152-1162.
<https://doi.org/10.1093/geronb/gby041>
- Shen, H. H. (2015). Core concept: Resting-state connectivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(46), 14115-14116.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1518785112>
- Shin, M.S. & Park, M.J. (2007). *STROOP: Color and word test children's version for ages 5-14*. Seoul: Hakjisa.
- Sonuga-Barke, E. J., & Castellanos, F. X. (2007). Spontaneous attentional fluctuations in impaired states and pathological conditions: a neurobiological hypothesis. *Neuroscience and biobehavioral reviews*, 31(7), 977-986.
<https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2007.02.005>
- Sporns O. (2013). Network attributes for segregation and integration in the human brain. *Current opinion in neurobiology*, 23(2), 162-171.
<https://doi.org/10.1016/j.conb.2012.11.015>
- Spreng, R. N., & Turner, G. R. (2019). Structure and function of the aging brain. In G. R. Samanez-Larkin (Ed.), *The aging brain: Functional adaptation across adulthood* (pp. 9-43). American Psychological Association.
<https://doi.org/10.1037/0000143-002>
- Spreng, R. N., Mar, R. A., & Kim, A. S. (2009). The common neural basis of autobiographical memory, prospection,

- navigation, theory of mind, and the default mode: a quantitative meta-analysis. *Journal of cognitive neuroscience*, 21(3), 489-510. <https://doi.org/10.1162/jocn.2008.21029>
- Staffaroni, A. M., Brown, J. A., Casaletto, K. B., Elahi, F. M., Deng, J., Neuhaus, J., Cobigo, Y., Mumford, P. S., Walters, S., Saloner, R., Karydas, A., Coppola, G., Rosen, H. J., Miller, B. L., Seeley, W. W., & Kramer, J. H. (2018). The longitudinal trajectory of default mode network connectivity in healthy older adults varies as a function of age and is associated with changes in episodic memory and processing speed. *Journal of Neuroscience*, 38(11), 2809-2817. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3067-17.2018>
- Stumme, J., Jockwitz, C., Hoffstaedter, F., Amunts, K., & Caspers, S. (2020). Functional network reorganization in older adults: Graph-theoretical analyses of age, cognition and sex. *NeuroImage*, 214, 116756. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.116756>
- Sun, F. T., Miller, L. M., & D'Esposito, M. (2005). Measuring temporal dynamics of functional networks using phase spectrum of fMRI data. *NeuroImage*, 28(1), 227-237. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.05.043>
- van Balkom, T. D., van den Heuvel, O. A., Berendse, H. W., van der Werf, Y. D., & Vriend, C. (2020). The Effects of Cognitive Training on Brain Network Activity and Connectivity in Aging and Neurodegenerative Diseases: a Systematic Review. *Neuropsychology review*, 30(2), 267-286. <https://doi.org/10.1007/s11065-020-09440-w>
- Yeo, B. T., Krienen, F. M., Sepulcre, J., Sabuncu, M. R., Lashkari, D., Hollinshead, M., Roffman, J. L., Smoller, J. W., Zöllei, L., Polimeni, J. R., Fischl, B., Liu, H., & Buckner, R. L. (2011). The organization of the human cerebral cortex estimated by intrinsic functional connectivity. *Journal of Neurophysiology*, 106(3), 1125-1165. <https://doi.org/10.1152/jn.00338.2011>

노인 인지통제훈련에 따른 두뇌 기능적 연결성의 변화

김호영¹, 류애리², 최진영³

¹전북대학교 심리학과

²보스턴대학 심리학과

³서울대학교 심리학과

인지통제는 독립적인 삶에 중요한 영역-일반적인 과정이며, 인지노화에 취약하다. 본 연구는 건강한 노인을 대상으로 인지통제 훈련이 인지기능과 뇌활성화에 미치는 효과를 확인한 Kim, Lee, & Chey(2017)의 fMRI 자료를 이용하여 인지통제 훈련이 휴지 상태와 인지통제과제 수행 시 뇌의 기능적 연결성에 미치는 효과를 탐색하고자 하였다. 64-77세 노인 25명(훈련집단 13명, 비교집단 12명)의 자료가 분석되었으며, 훈련집단은 총 8주 동안 24회기의 인지통제 훈련에 참여하였고, 두 집단 모두에게 사전과 사후 시점에 신경심리검사와 fMRI가 실시되었다. 비교집단에 비교하여, 훈련집단은 훈련 후 휴지 상태에서 감각운동네트워크의 연결성은 감소하였고, 인지통제 과제 중의 DMN 네트워크의 연결성은 증가하였다. 또한 이러한 기능적 연결성의 변화는 인지통제 기능의 변화와 관련되었다. 인지통제훈련 후에 나타난 기능적 연결성 변화의 의미에 대해 논의하고, 추후 연구 방향을 제안하였다.

주제어: 전산화된 인지훈련, 집행기능, 기본 모드 네트워크, 기능적 자기공명영상

부록 1. 인지통제훈련 과제

과제	기술	관련 요소
위치-숫자 Stroop	숫자 행렬이 제시되면(4x4, 5x5 행렬), 각 행에서 숫자가 제시된 칸의 가로 위치(좌측으로부터 몇 번째 칸)를 보고하는 과제. 모두 시행은 제시된 숫자와 보고해야 하는 칸의 위치가 불일치함(예. 좌측에서 두 번째 칸에 제시된 '4'의 경우, 정답은 2). 레벨 1, 2는 정답을 숫자 키로 보고하고, 레벨 3, 4에서는 숫자가 제시된 칸의 행과 열을 전치(transpose)하여 빈 행렬에서 해당 칸을 마우스로 클릭하는 과제(예. 2행 3열 칸에 숫자가 제시되면, 3행 2열 칸을 클릭).	억제
가위바위보	화면에 제시된 손 그림과 각 레벨 별로 상이한 규칙의 '가위바위보' 게임을 진행함: 레벨 1. 이기는 게임, 레벨 2. 지는 게임, 레벨 3. 제시된 손의 색에 따라 이기는 게임(분홍 손)과 지는 게임(파란 손)이 혼합된 게임, 레벨 4. 레벨 3의 게임을 수행하다 '초록 손'이 나오면 직전 시행과 같은 규칙의 게임, '노란 손'이 나오면 직전 시행과 다른 규칙의 게임을 수행함.	억제 주의전환 정보업데이트
세모네모	색깔(빨강, 노랑)과 모양(세모, 네모)을 포함한 4가지 자극 중 하나가 화면에 제시되면, 특정 표적 자극(빨간 네모, 노랑 세모)에만 선택적으로 주의를 기울여 반응하는 연속수행 과제(레벨 1, 2)와 색깔에 상관없이 모양이 바뀔 때만 반응하고 같은 모양이 연속해서 나올 때는 반응을 억제해야 하는 과제(레벨 3, 4). 한 훈련 회기에서 레벨 1과 3, 레벨 2와 4를 짝지어 실시하여 동일한 자극에 대해 규칙을 전환하여 상이한 과제를 수행하게 함. 레벨 2, 4에서는 레벨 1, 3보다 자극제시 시간이 짧아짐.	억제 주의전환
업데이트	각각 5가지 색깔, 위치, 글자를 이용한 3가지 버전의 업데이트 과제를 포함함. 각 과제에 해당하는 5가지 자극이 5-13개 범위에서 무선적으로 제시되면, 마지막 몇 개의 자극을 가능한 빨리 회상해야 함. 모든 과제는 3가지 레벨로 구성되며, 레벨에 따라 회상해야 하는 정보의 개수는 2에서 4까지 증가함.	억제 정보업데이트
별 세기	반응억제 과제의 일종인 Simon 과제와 미래계획기억(prospective memory) 과제를 동시에 수행해야 하는 이중과제임. 화면 좌우에 각기 다른 색으로 제시되는 별무리를 세어 더 많은 쪽이 빨간색이면 오른손 버튼을, 초록색이면 왼손 버튼을 누르는 과제를 기본적으로 수행하면서 양쪽의 합이 정해진 개수(레벨 1은 3개, 레벨 2는 7개)가 되면 가운데 스페이스 마도 함께 눌러야 함. 더 많은 쪽 자극의 위치와 정반응 버튼의 위치가 불일치하는 조건(예. 화면 왼쪽에 제시된 빨간색 별이 더 많은 경우)을 두어 반응 선택의 갈등을 유발하도록 함.	억제 미래계획기억 이중과제수행

부록 2. 243 Regions of interest(ROIs) list

Visual Network (VN)

Labels	MNI coordinate	Labels	MNI coordinate	Labels	MNI coordinate
Occipital_Inf_L	-25 -98 -12	Calcarine_R	20 -66 2	Temporal_Inf_R	42 -66 -8
Occipital_Inf_R	27 -97 -13	Occipital_Mid_L	-24 -91 19	Occipital_Sup_R	24 -87 24
Lingual_L	-13 -40 1	Fusiform_R	27 -59 -9	Cuneus_R	6 -72 24
ParaHippocampal_L	-26 -40 -8	Lingual_L	-15 -72 -8	Occipital_Mid_L	-42 -74 0
ParaHippocampal_R	27 -37 -13	Calcarine_L	-18 -68 5	Fusiform_R	26 -79 -16
Temporal_Inf_L	-34 -38 -16	Occipital_Inf_R	43 -78 -12	Cuneus_L	-16 -77 34
Lingual_R	8 -91 -7	Occipital_Inf_L	-47 -76 -10	Cuneus_L	-3 -81 21
Lingual_R	17 -91 -14	Occipital_Sup_L	-14 -91 31	Occipital_Mid_L	-40 -88 -6
Lingual_L	-12 -95 -13	Occipital_Sup_R	15 -87 37	Occipital_Mid_R	37 -84 13
Lingual_R	18 -47 -10	Occipital_Mid_R	29 -77 25	Calcarine_R	6 -81 6
Occipital_Mid_R	40 -72 14	Lingual_R	20 -86 -2	Occipital_Mid_L	-26 -90 3
Calcarine_R	8 -72 11	Cuneus_R	15 -77 31	Occipital_Inf_L	-33 -79 -13
Calcarine_L	-8 -81 7	Lingual_L	-16 -52 -1	Occipital_Mid_R	37 -81 1
Occipital_Mid_L	-28 -79 19				

Somatomotor Network (SMN)

Labels	MNI coordinate			Labels	MNI coordinate			Labels	MNI coordinate		
Cingulate_Mid_L	-14	-18	40	Supp_Motor_R	10	-17	74	Frontal_Sup_2_R	19	-8	64
Supp_Motor_L	0	-15	47	Postcentral_R	22	-42	69	Frontal_Sup_2_L	-16	-5	71
Supp_Motor_R	10	-2	45	Postcentral_L	-21	-31	61	Cingulate_Mid_L	-10	-2	42
Paracentral_L	-7	-21	65	Paracentral_L	-13	-17	75	Heschl_R	32	-26	13
Paracentral_L	-7	-33	72	Postcentral_R	42	-20	55	Temporal_Sup_R	58	-16	7
Postcentral_R	13	-33	75	Precentral_L	-38	-15	69	Temporal_Sup_L	-38	-33	17
Postcentral_L	-54	-23	43	Parietal_Sup_L	-16	-46	73	Temporal_Sup_L	-60	-25	14
Precentral_R	29	-17	71	Paracentral_R	2	-28	60	Temporal_Sup_L	-49	-26	5
Postcentral_L	-23	-30	72	Supp_Motor_R	3	-17	58	Rolandic_Oper_R	43	-23	20
Precentral_L	-40	-19	54	Precentral_R	38	-17	45	SupraMarginal_L	-53	-22	23
Postcentral_R	29	-39	59	Postcentral_L	-49	-11	35	Heschl_L	-55	-9	12
Postcentral_R	50	-20	42	Insula_R	36	-9	14	Rolandic_Oper_R	56	-5	13
Precentral_L	-38	-27	69	Postcentral_R	51	-6	32	Heschl_L	-30	-27	12
Precentral_R	20	-29	60	Postcentral_L	-53	-10	24	Temporal_SupP_L	-55	-40	14
Precentral_R	44	-8	57	Postcentral_R	66	-8	25	Temporal_SupP_R	52	-33	8
Postcentral_L	-29	-43	61								

Limbic Network (LN)

Labels	MNI coordinate			Labels	MNI coordinate			Labels	MNI coordinate		
OFCmed_R	24	32	-18	Frontal_pole_L	-18	63	-9	Fusiform_L	-31	-10	-36
OFCmed_R	8	41	-24	Temporal_Pole_Mid_R	46	16	-30	Temporal_Inf_R	49	-3	-38
Fusiform_L	-37	-29	-26	OFCant_L	-21	41	-20	Temporal_InfA_L	-50	-7	-39
Temporal_Inf_R	52	-34	-27	Fusiform_R	33	-12	-34				

Dorsal Attention Network (DAN)

Labels	MNI coordinate			Labels	MNI coordinate			Labels	MNI coordinate		
Postcentral_R	10	-46	73	Parietal_Inf_R	33	-53	44	Parietal_Sup_R	25	-58	60
Postcentral_L	-45	-32	47	Precuneus_R	10	-62	61	Parietal_Inf_L	-33	-46	47
Postcentral_R	59	-17	29	Temporal_MidP_L	-52	-63	5	Parietal_Sup_L	-27	-71	37
Occipital_Sup_L	-41	-75	26	Temporal_InfP_L	-47	-51	-21	Frontal_Mid_2_L	-32	-1	54
Occipital_Mid_R	43	-72	28	Temporal_InfP_R	46	-47	-17	Temporal_InfP_L	-42	-60	-9
Precuneus_R	4	-48	51	Postcentral_R	47	-30	49	Parietal_Sup_L	-17	-59	64
Temporal_InfP_R	58	-53	-14	Parietal_Sup_R	22	-65	48	Precentral_R	29	-5	54
Parietal_Inf_L	-28	-58	48	Temporal_MidP_R	46	-59	4				

Ventral Attention Network (VAN)

Labels	MNI coordinate			Labels	MNI coordinate			Labels	MNI coordinate		
Precuneus_L	-7	-52	61	Tempoal_Pole_Sup_L	-51	8	-2	Frontal_Inf_Orb_2_R	37	32	-2
Supp_Motor_L	-3	2	53	Cingulate_Mid_L	-5	18	34	ACC_sup_L	-11	26	25
SupraMarginal_R	54	-28	34	Insula_R	36	10	1	Supp_Motor_L	-1	15	44
Insular_R	37	1	-4	Temporal_Sup_R	65	-33	20	Cingulate_Mid_R	5	23	37
Supp_Motor_R	13	-1	70	SupraMarginal_L	-50	-34	26	ACC_sup_R	10	22	27
Supp_Motor_R	7	8	51	Precuneus_R	11	-39	50	Frontal_Mid_2_R	26	50	27
Rolandic_Oper_L	-45	0	9	Frontal_Inf_Tri_R	48	22	10	Temporal_Mid_L	-56	-50	10
Frontal_Inf_Oper_R	49	8	-1	Insula_R	36	22	3	Temporal_Sup_R	56	-46	11
Insula_L	-34	3	4								

Frontoparietal Network (FPN)

Labels	MNI coordinate			Labels	MNI coordinate			Labels	MNI coordinate		
Temporal_InfP_L	-56	-45	-24	Precentral_R	47	10	33	Frontal_Mid_2_R	43	49	-2
Temporal_Mid_R	65	-24	-19	Precentral_L	-41	6	33	Frontal_Inf_Tri_L	-42	25	30
Temporal_Inf_R	55	-31	-17	Frontal_Mid_2_L	-42	38	21	Frontal_Sup_Medial_L	-3	26	44
Frontal_Mid_2_R	34	38	-12	Frontal_Mid_2_R	38	43	15	Precentral_R	42	0	47
Precuneus_L	-7	-71	42	Parietal_Inf_R	49	-42	45	Frontal_Mid_2_R	31	33	26
Precuneus_R	11	-66	42	Parietal_Inf_R	44	-53	47	Insula_A_L	-35	20	0
Precentral_L	-44	2	46	Frontal_Mid_2_R	32	14	56	Insula_R	34	16	-8
Frontal_Inf_Tri_R	48	25	27	Angular_R	37	-65	40	Frontal_Sup_2_L	-28	52	21
Frontal_Inf_Oper_L	-47	11	23	Parietal_Inf_L	-42	-55	45	ACC_sup_L	0	30	27
Parietal_Inf_L	-53	-49	43	Frontal_Mid_2_R	40	18	40	Frontal_Sup_2_R	31	56	14
Frontal_Sup_2_L	-23	11	64	Frontal_Mid_2_L	-34	55	4	Frontal_pole_L	-39	51	17
OFCant_R	24	45	-15	Frontal_Mid_2_L	-42	45	-2	Cingulate_Mid_R	2	-24	30
Frontal_Mid_2_R	34	54	-13								

Default Mode Network (DMN)

Labels	MNI coordinate			Labels	MNI coordinate			Labels	MNI coordinate		
ParaHippocampal_L	-21	-22	-20	Frontal_Sup_Medial_L	-10	39	52	Temporal_Mid_L	-58	-30	-4
ParaHippocampal_R	17	-28	-17	Frontal_Sup_2_L	-16	29	53	Temporal_Mid_R	65	-31	-9
Frontal_Med_Orb_R	6	67	-4	Frontal_Mid_2_L	-35	20	51	Temporal_Mid_L	-68	-41	-5
Rectus_R	8	48	-15	Frontal_Sup_2_R	22	39	39	Frontal_Sup_Medial_R	13	30	59
Angular_L	-46	-61	21	Frontal_Sup_Medial_R	13	55	38	ACC_sup_R	12	36	20
Temporal_Pole_Mid_L	-44	12	-34	Frontal_Sup_2_L	-10	55	39	Temporal_Mid_R	52	-2	-16
Temporal_Mid_L	-68	-23	-16	Frontal_Sup_2_L	-20	45	39	Temporal_MidA_R	52	7	-30
Temporal_Mid_L	-58	-26	-15	Frontal_Sup_Medial_R	6	54	16	Temporal_MidA_L	-53	3	-27
Insula_R	27	16	-17	Frontal_Sup_Medial_R	6	64	22	Angular_R	47	-50	29
Angular_L	-44	-65	35	ACC_pre_L	-7	51	-1	Temporal_MidP_L	-49	-42	1
Angular_L	-39	-75	44	Frontal_Sup_Medial_R	9	54	3	Insula_L	-31	19	-19
Precuneus_L	-7	-55	27	Frontal_Med_Orb_L	-3	44	-9	Cingulate_Post_L	-2	-35	31
Precuneus_R	6	-59	35	Frontal_Med_Orb_R	8	42	-5	Frontal_Inf_Orb_2_L	-46	31	-13
PCC_L	-11	-56	16	ACC_pre_L	-11	45	8	Supp_Motor_Area_L	-10	11	67
Precuneus_L	-3	-49	13	Frontal_Sup_Medial_L	-2	38	36	Frontal_Inf_Orb_2_R	49	35	-12
Cingulate_Post_R	8	-48	31	ACC_pre_L	-3	42	16	SupraMarginal_R	55	-45	37
Precuneus_R	15	-63	26	Frontal_Sup_2_L	-20	64	19	Temporal_Sup_R	54	-43	22
Cingulate_Mid_L	-2	-37	44	Frontal_Sup_Medial_L	-8	48	23	Temporal_Mid_R	51	-29	-4
Precuneus_R	11	-54	17	Temporal_Mid_R	65	-12	-19	Frontal_Inf_Tri_R	53	33	1
Angular_R	52	-59	36	Temporal_Mid_L	-56	-13	-10	Frontal_Inf_Tri_L	-49	25	-1
Frontal_Sup_2_R	23	33	48								