운동선수 경기력 수준과 작업기억 능력의 관계 검증을 위한 전전두엽의 혈역학적 분석: A Functional Near-Infrared Spectroscopy Study

장태석 PhD, 윤서진 PhD

한국스포츠정책과학원 스포츠과학실

Hemodynamic Analysis of the Prefrontal Cortex to Verify the Relationship Between Athlete Performance Level and Auditory-Spatial Working Memory: A Functional Near-Infrared Spectroscopy Study

Tai-Seok Chang PhD, Seo-Jin Youn PhD

Department of Sports Science, Korea Institute of Sport Science, Seoul, Korea

PURPOSE: The purpose of this study was to investigate the difference between the performance level and working memory of athletes through behavioral response measurements and hemodynamic measurements of the prefrontal cortex.

METHODS: The study included 12 higher-level athletes, 12 athletes, and 12 non-athletes. The study task was to perform auditory-spatial working memory tasks according to difficulty (1 back, 2 back). Reaction times and hemodynamic changes in the cerebral prefrontal cortex were measured using the NIRSIT instrument during task performance.

RESULTS: Behavioral response measurements of the superior players showed faster reaction times in the 1-back and 2-back tasks compared to the other two groups, and the functional connectivity of the cerebral prefrontal cortex showed strong activation in the 2-back task.

CONCLUSIONS: In the case of higher-level athletes, it is suggested that working memory ability and motor performance are significant, and that working memory ability can be an important variable in sports situations.

Key words: Auditory-spatial working memory, Athlete, fNIRS, Prefrontal cortex

서론

운동선수들이 가지는 전문성(expertise)에는 무엇이 있을까? 라는 궁금증을 해결하고자 선수들이 가지는 전문적인 특성을 규명하기 위해서 신경과학적(neuroscience) 접근의 연구가 시도되고 있다[1]. 초기 원숭이를 대상으로 한 선행연구를 살펴보면 원숭이에게 반복적으로

많은 시간의 훈련을 시키면 대뇌의 움직임과 관련이 있는 일차 운동영역(primary motor area)에서 뉴런의 시냅스 형성(synaptogenesis), 발화율(neuronal firing), 지형의 변화(alterations in topography)가 나타난다고 보고하였다[2,3]. 이는 지속적인 운동수행을 통해서 선수들이 움직임과 관련된 특정 영역의 뇌 활용능력이 변화될 수 있음을 예측할 수 있다.

Corresponding author: Seo-Jin Youn Tel +82-2-970-9500 Fax +82-2-970-9651 E-mail seojin0313@daum.net

Keywords 청-공간적작업기억, 운동선수, 근적외선분광분석기, 전전두엽

Received 10 Jul 2021 **Revised** 10 Aug 2021 **Accepted** 26 Aug 2021

© This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

스포츠는 일반적으로 역동적인 환경을 포함하고 있기 때문에 운동 선수는 운동 기술을 능숙하게 수행하기 위해서 높은 지각 능력을 필요로 한다[4].

선행연구들을 보면 선수와 비선수는 움직임과 관련된 지각 판단 능력의 차이가 있으며, 선수들은 자극을 인식하고 맥락을 파악하기 때문이다. 또한 선수들은 움직임에 필요한 지각(perception)과 관련된 기능이 뛰어나다. 이렇게 우수한 지각 능력은 자극에 대해서 필요한 반응을 예측하고 효율적인 움직임을 가져올 수 있도록 필요한 대뇌 영역을 활용해 지각에 대한 반응을 수행한다. 위에서 언급한 것처럼 선수들은 반복적이고 장기적인 훈련을 통해 뇌의 신경가소성(Neural plasticity)을 발생시키며, 이러한 메커니즘은 인지적 처리를 통해 해당 뇌 기능의 향상을 가져왔기 때문이다. 이에 대한 근거로 인지과제 수행 시 높은 수행을 보인 집단은 낮은 수행을 보인 집단에 비해 전두엽 영역에 더 높은 피질의 활성화도를 보였으며[5], 높은 인지능력을 가진 전문가는 낮은 수행자보다 신경효율성(Neural efficiency)이 좋다는 결과를 도출해 냈다[6]. 위와 같은 선행연구는 선수들이 지속적인 수행을 통해 운동과 관련된 뇌 기능이 향상되었음을 알 수 있다.

최근 선수들의 전문성과 관련된 인지능력 중에서 작업기억이 중요한 변인임을 언급하였다[7]. 작업기억은 한정된 양의 정보를 일시적으로 유지함과 동시에 관리하고 조작할 수 있게 해주는 역할을 하며, 지각(perception), 장기기억(long-term memory) 및 행동 사이를 연결하는 기능을 담당하기 때문에[8], 선수들의 전문성을 반영할 수 있는 중요한 요인이다. 실제 선수들을 대상으로 한 연구를 살펴보면, 작업기억은 목표를 달성하기 위한 수행에서 간섭이 발생했을 경우에 작업기억 능력이 좋은 사람은 이에 대한 주의력을 제어함으로써 정확한 의사결정에 긍정적 영향을 미친다고 보고하였으며[9], 사격 수행에서 압박이 발생할 경우 작업기억 능력이 좋은 선수는 주의력에 대한 조절을 효과적으로 하였다[10]. 또한 조이스틱 과제, 손가락 탭핑 과제(Finger tapping task) 등을 통해 작업기억 능력은 운동기술 습득(motor skill acquisition)과 연관성이 있다고 하였다[11,12]. 작업기억은 자극에 대한 정보를 온라인(online)으로 유지 및 조작 그리고 모니터링 하는 기능을 담당하고 있으며, 많은 선행연구에서는 작업기억 과제 수행 시 전전두엽 피질(PFC)의 역할에 대해 밝혀냈다[13-15].

위와 같은 인지과제 수행에 따른 반응을 살펴보기 위해서 전전두엽(prefrontal cortex)의 변화를 functional near-infrared spectroscopy (fNIRS)를 활용해 차이를 밝혀냈다[16,17]. fNIRS는 시간적 공간뿐만 아니라 공간 해상도를 제공하기 때문에 다양한 연구에서 사용되고 있다[18,19]. fNIRS는 비 침습적 방법으로 근적외선을 사용하여 국소조직의 산소화를 측정하고, 측정에서 나온 산화헤모글로빈(HbO₂), 탈산화헤모글로빈(HHb), 총 헤모글로빈(tHB)의 변화를 통해 결과를 얻는다[20]. 인간은 자극을 받아들이고 이를 처리하는 인지과정에서 뇌의

신경활동이 증가하면 포도당과 산소 소비가 증가하면서 HbO₂ 농도가 증가하기 때문에(Matsuyama et al., 2009), 인지과제 수행 시 fNIRS를 활용하여 뇌의 여러 영역에 대한 반응을 통해 특성을 밝히려 노력하였다[16,21,22]. 또한 fMRI가 가진 단점에 대한 대안으로 fNIRS의 기능이 뛰어난 선행연구에서 입증하였다[23,24].

오랫동안 신경영상 관련 연구는 과제 수행 시 뇌 기능이 피험자마다 어떻게 다른지, 이러한 차이가 피험자의 행동 수행 차이와 어떤 관련이 있는지에 대해서 파악하려 했다. 이런 연구는 주로 기능을 담당하는 뇌 영역에 대한 구조를 파악하는데 초점을 두었다. 뇌가 공간적인 기능이 구분이 되지만 기능적으로 협력하는 작은 단위의 복잡한 네트워크라는 주장이 지속적으로 제기되었고, 최근에는 과제 수행에서 활성화 되는 영역에서 한발 더 나아가 영역들 사이의 연결성을 조사하기 위해 연구가 진행되고 있다[25]. 뇌의 영역들 사이의 기능적인 연결은 양쪽(pair-wisely)의 영역에서 시간적 상관관계의 신경생리학적 변화 혹은 자극에 의해 유발하는 혈액학적 변동 사이에서 발견할 수 있다[26].

종합해보면, 작업기억의 능력은 선수들의 우수한 경기력과 연관이 되어 있는 것을 알 수 있으며, 이러한 능력은 대뇌 전전두엽에서 기능적 연결성과도 관련이 있을 것이다. 이를 규명하기 위해서 따라서 본 연구에서는 세계적인 경기 기량을 갖고 있는 선수와 선수의 작업기억 능력의 반응시간 차이를 살펴보고, 근적외선 분광분석기를 활용하여 전전두엽의 좌우뇌의 연결성의 차이를 살펴보고자 한다.

연구 방법

1. 연구 참여자

연구 대상자는 연구의 목적에 따라 우수선수, 선수, 비선수로 분류하였다. 또한 선수의 종목은 라켓종목의 선수로 선정하였다. 또한 선수 집단 사이의 특성을 파악하기 위해서 우수선수 집단은 선수 경력이 5년에서 10년 이하로, 국제 대회에서 메달을 획득한 경험이 있는 선수로 선정하였으며, 선수는 경력이 10년 이하인 선수로 선정하였고, 비선수는 선수 경험이 없는 일반인으로 선정하였다. 실험에 참여한 모든 대상은 과거 뇌질환의 병력이 없으며, 교정시력이 1.0 이상의 피험자로 모집하였다. 피험자는 총인원 36명으로 구성되었으며, 각 집단별로 12명 씩으로 설정하였다.

2. 연구 과제 및 절차

1) 연구과제

본 연구의 피험자들이 수행한 청-공간적 작업기억으로 자극 제시 화면은 하얀색 바탕에 9개의 공간으로 구성되었다. 과제는 9개의 공간 안에 파란색으로 공간적 위치 자극과 알파벳 음성의 청각 자극이 동시에 제시된다. 청각 음성 자극은 'A', 'C', 'E', 'I', 'K' 로 5개의 음성이 제

Fig. 1. auditory-spatial working memory task (N-back).

시 되었으며, 피험자는 청각 자극과 공간 위치 자극을 구분하여 이전에 제시된 자극과 공간이 똑같으면 A를 누르고 이전 자극과 청각 자극이 똑같으면 L을 선택하는 청공간적 작업기억 1-back 과제를 수행하였다(Fig. 1). 그 후에 전전 자극과 같으면 반응하는 청-공간적 작업기억 2-back 과제를 수행하였다(Fig. 1). 피험자는 1회기 20번의 청-공간적 자극에 대한 반응을 수행하고, 총 3회기 60회의 선택반응을 하였다. 과제는 1-back 수행 후에 2-back 과제를 수행하였다(Fig. 1).

2) 연구절차

본 연구의 실험에서 피험자는 실험에 앞서 실험 전반에 대한 설명과 주의사항을 듣고 실험에 동의하는 동의서를 작성하였다. 이후 청-공간적 작업기억 과제 1-back, 2-back을 각각 20회씩 연습을 한 후에 근적외선 분광 분석기를 착용하여 실험 준비를 마쳤다. 이후 보정작업을 통해 전전두엽 측정이 원활한지를 확인한 후 측정을 시작하였다. 1-back 과제 수행 후 피로를 호소하거나 불편함을 호소하는 피험자에게는 충분한 휴식시간을 제공하였으며, 준비부터 측정까지는 약 20분의 시간이 소요되었다.

3. 측정방법

본 연구에서는 작업기억 능력을 평가하기 위해서 연구에서 많이 활용되고 있는 N-back 과제를 수행하였다. 이 과제는 제시되는 자극을 통해 피험자의 집행, 통제, 파지 능력을 평가할 수 있다. 또한 N은 이전 자극을 기억해야 하는 수를 의미하며 본 연구에서는 1-back, 2-back 과제를 수행하였으며, 숫자가 늘어날수록 피험자가 느끼는 과제난이도는 늘어나게 되고 인지적 부하가 증가하게 된다. 이와 관련한 단일세포를 활용한 연구에서는 피험자가 표적 자극에 대해서 선택 반응할 때 자극이 제시된 후 일정한 지연 시간 동안 대뇌 전전두엽에서 활성화 상태로 남아있는 뉴런이 발견되었다[27]. 본 연구에서의 실험 과제는 MATLAB 기반으로 제작하였으며, 전전두엽의 혈역학적 특성을 측정하는 장비인 NIRSIT과 호환(Local host-Synk-ip 방법)하여 작업기억 과제 수행 시 행동반응(반응시간)과 혈역학적 차이를 동시에 측정하였다. 효율적 행동 반응을 측정하기 위해서 반응에 방해가 되지 않도록 해당 반응키를 제외한 다른 키들은 모두 제거하였다. 자극에 대한 반응시간은 1/1,000초로 측정되었으며, 뇌 혈류량 측정은 NIRS 시스템(NIRSIT; OBELAB Inc., Korea)을 사용하여 세 집단의 전전두엽의 산소 헤모글로빈의 값을 측정했다. 이 장비는 24개의 소스(laser diodes)와 32개의 검출기(detectors)가 있으며, 8.138 Hz 샘플링 속도에서 과제 수

Fig. 2. Experiment of auditory-spatial working memory task.

행 시 전전두엽의 활성화를 측정하였다. 또한 소스와 검출기 사이 간격을 3 cm로 설정한 후 48채널을 측정하였다. 본 연구의 실험 장면은 Fig. 2와 같다.

4. 분석방법

1) 반응시간 데이터 처리

청-공간적 작업기억 과제 수행 시 1-back, 2-back 각각 60회 과제를 수행하였으며, 자극 제시 후 300 ms에서 다음 자극이 제시되는 1,500 ms 이전 데이터만 분석에 활용하였다. 과제 난이도와 세 집단 사이의 반응시간 차이를 살펴보기 위해 two-way ANOVA with repeated measure로 분석하였고, 주효과가 나타났을 때 Bonferroni 사후분석을 실시하였다. 통계적 유의수준은 .05로 설정하였고, SPSS 25.0 프로그램을 사용하여 분석을 실시하였다.

2) 전전두엽 연결성 데이터 처리

두 집단의 작업기억 과제 수행에서 전전두엽의 혈류량의 차이를 살펴보기 위해서 high-density NIRS (NIRSIT; OBELAB Inc., Korea) 장비를 사용하였고(NIRSIT; OBELAB Inc.), 780/850 nm대역에서 8.138 Hz sampling rate로 설정하였다. 전전두엽의 구체적인 연결성을 보기 위해서 24개의 sources (laser diodes), 32개의 detector, 총 48개 채널에서 혈류량의 변화를 측정하였다(Fig. 3).

신호처리를 위해 각각의 파장에서 감지된 광 신호는 밴드패스필터 (bandpass filter) (0.005-0.1 Hz)로 필터링 하였고, 측정 결과 오류를 최소화 하기 위해서 혈류량(hemodynamics) 데이터를 추출하기 전에 낮은 수준 채널(poor-quality) (signal-to-noise ratio < 30 dB)은 제외시켰다. 또한 과제 수행 동안 각 채널의 상대적 혈류량 변화는 modified Beer-Lambert law를 사용하여 계산하였으며, 선수 개별적인 블록 평균 (Block-averaging)을 구한 다음 그룹에 대한 평균을 계산하였다. 전전두

Fig. 3. Difference in 1-back (A) and 2-back (B) reaction times by group when performing auditory-spatial working memory task.

엽의 기능적 연결성을 분석하기 위해서 과제 수행 시 모든 채널 사이의 혈액학적 시간적 상관 강도를 사용하여 측정하였으며, 이후 계산된 전전두엽의 상관계수를 사용하여 밀도(density), 클러스터링 계수(clustering coefficient), 효율성(efficiency)과 같은 네트워크 측정 값을 추출하였다. 본 연구에 참여한 세 그룹의 기능적 연결성을 정량적으로 비교하기 위해서 Racz et al. [28]의 연구에서 사용된 상관계수에 가중치 임계 값을 적용하였으며, 데이터 처리와 분석을 위해 MATLAB 2018을 사용하여 뇌 연결성 툴박스(toolbox)를 사용하여 분석하였다[29].

모든 신호처리과정을 거친 후에 통계적 연관성(Pearson Correlation)을 통해 청-공간적 작업기억 과제 수행에서 나타나는 전전두엽의 기능적 연결성을 분석하였다.

결 과

1. 행동반응 결과

우수선수, 선수, 비선수의 행동반응의 차이를 알아보기 위해 청-공

Fig. 4. Results of functional connectivity of prefrontal cortex by group when performing auditory-spatial working memory task.

Table 1. Descriptive statistical results on reaction time by group when performing auditory-spatial working memory task (unit: seconds)

Group	N	Average	Standard deviation
1-back			
Non-athletes	12	1.22	±0.12
Athletes	12	1.23	±0.13
Excellent- athletes	12	1.11	±0.95
2-back			
Non-athletes	12	1.42	±0.13
Athletes	12	1.38	±0.11
Excellent- athletes	12	1.29	±0.82

간적 작업기억과제 수행 시 반응시간을 측정한다 하였다. 이에 대해 반복측정 일원분산분석을 한 결과는 다음과 같다. 기술통계(Descriptive statistics)결과는 다음 Table 1과 같다.

1-back 과제 수행에서 집단 간에 유의한 차이가 나타났으며($F_{(2, 35)} = 3.971, p < .05, \eta^2 = .194$), 집단 사이에 효과를 검증하기 위한 사후분석에서 우수선수와 선수 사이에 차이가 나타났다. 2-back 과제에서는 집단 간에 유의한 차이가 나타났고($F_{(2, 35)} = 3.989, p < .05, \eta^2 = .195$), 집단 사이에 차이를 살펴보기 위한 사후 분석 결과 우수선수와 비선수 사이에 차이가 나타났다.

2. 전전두엽 연결성 차이 결과

본 연구 결과에서는 산소헤모글로빈(oxy-HB)의 수치로 집단 간 차

이를 분석하였다.

fMRI의 blood oxygenation level dependent (BOLD) 측정에서 산소헤모글로빈은 탈산소헤모글로빈보다 대뇌 피질의 활성화를 더욱 잘 반영한다는 선행연구를 토대로 본 연구에서는 산화헤모글로빈의 수치를 가지고 집단 간의 차이를 비교하였다[30,31]. Fig. 4는 청공간적 작업 기억 과제 수행 시 세 집단의 전전두엽의 기능적 연결성의 통계적 상관성을 나타낸 것이다.

결과를 살펴보면 1-back 과제에서는 비선수와 선수 집단이 우수선수 집단보다 기능적 연결성이 활발하게 나타난 것으로 나타났고, 과제 난이도가 높은 2-back 과제에서는 우수선수 집단이 다른 두 집단보다 기능적 연결성이 높게 나타났다.

세 집단의 기능적 연결성을 보다 자세히 보기 위해서 역치 값은 0부터 1까지 0.1 간격으로 나뉘서 밀도(density) 개수를 구하여 정규성을 분석하였으며, 그 결과는 Fig. 5와 같다.

논 의

작업기억 능력은 스포츠와 관련된 기술을 학습하고 습득할 때 영향력 있는 변수이며, 시합 상황에서 압박감, 전술적 의사결정, 운동기술 습득, 스포츠전문 지식을 수행하는데 중요한 기능을 담당한다[7]. 운동선수와 관련하여 이전의 선행연구는 작업기억 능력을 측정하는데 있어서 스포츠상황과 관련된 과제를 활용하여 평가하였기 때문에 선

Fig. 5. Efficiency change of threshold value for each group when performing auditory-spatial working memory.

수들에게 익숙한 자극으로 인한 작업기억 능력이 우수하게 평가되었다는 판단이 되었다. 따라서 본 연구에서는 일반적인 작업기억 과제를 사용하여 우수선수, 선수, 비선수로 나눠 일반적인 작업기억 능력을 측정하여 연구에 활용하였다. 또한 운동선수들이 지니는 특성을 살펴 보기 위해서 국내외 많은 분야에서 연구가 이뤄지고 있다. 최근 연구 동향은 인지신경과학적으로 접근하여 선수들의 뇌의 변화를 측정해 그 특성을 밝히려는 접근을 하고 있다. 따라서 본 연구에서는 작업기억 과제 수행 시 우수선수와 선수, 그리고 비 선수 세 집단의 전전두엽 연결성의 차이 비교를 통해 세계수준의 선수들이 가지는 작업기억 능력을 파악하는 것이 목적이다. 이를 위해 청-공간적 작업기억과제(1-back, 2-back)를 수행하였으며, 반응시간과 fNIRS를 통해 전전두엽의 연결성을 확인하였다.

본 연구에 대한 결과를 바탕으로 구체적인 논의는 다음과 같다.

반응시간 측정 결과 1-back 과제에서는 우수선수가 선수보다 120 ms, 일반인보다는 110 ms 빠른 반응시간을 보였고, 2-back 과제에서는 우수선수가 선수보다 130 ms, 일반인보다는 90 ms 빠른 반응시간을 보였다. 반응시간은 자극이 제시되고 이를 인식한 후 후속행동 반응사이의 시간을 의미하는데[32], 본 연구 결과를 통해 살펴보면 비선수와 선수집단은 작업기억 과제 수행 시 반응시간에 대한 차이가 미비하게

나타났으나 우수선수와 두 집단에서는 청-공간적 작업기억 과제(1-back, 2-back) 모두에서 차이가 있는 것으로 나타났다. 작업기억은 자극이 제시되면 장기기억에서의 정보를 가져와 음운루프(phonological loop), 일화적 완충기(episodic buffer), 시공간 메모장(visuospatial sketchpad)의 감각을 활용하여 정보를 처리하게 된다(Cowan, 1988). 본 연구에서 사용한 N-back 과제 외에 작업기억과 관련된 Stroop 과제[33], Negative Priming 과제[34], Enumeration 과제[35], Flanker 과제[36]에서도 통해서 개인마다 작업기억의 용량 차이가 나타난다는 결과를 보였다.

이런 선행연구를 통해 본 연구결과를 토대로 접근하면 우수한 경기 능력을 갖는 선수는 경기 능력 뿐만 아니라 일반적인 작업기억 능력이 우수하기 때문에 반응시간에서 다른 두 집단과 차이가 나타났다는 것으로 판단할 수 있으며, 작업기억의 정보처리 속도가 빠르다고 해석할 수 있다.

대뇌 전전두엽의 혈류역학적 결과에서는 1-back 과제에서는 우수선수보다 다른 두 집단에서 전전두엽의 기능적 연결성이 강하게 나타났으며, 2-back 과제에서는 우수선수가 다른 두 집단보다 기능적 연결성이 강하게 나타났다(Figs. 4, 5). 또한 과제 난이도에 따라 기능적 연결성의 차이를 알아보기 위해 2-back 과제 수행 시 나타난 수치에서 1-back 과제 수행에서 나타난 혈류역학적 수치를 뺀 결과는 Fig. 6과 같다. 그

Fig. 6. Functional connectivity minus the 1-back results in 2-back.

람을 보면 우수선수, 선수, 비선수 순서로 기능적 연결성이 강하게 나타났다는 것을 알 수 있다. 이런 결과는 우수한 경기능력을 갖고 있는 선수들이 청-공간적 작업기억 과제를 처리하는데 있어서 높은 효율성을 보인다고 판단할 수 있다.

전문 기술 수행을 하는 선수들은 훈련 및 기술 습득을 통해 뇌 신경 활성화에 변화를 가져온다[37]. 또한 전문가들은 익숙한(친숙한) 자극에 대한 인식에 빠르게 반응하여 운동준비(motor preparation)를 하고 이후 행동을 수행에 필요한 세밀한 동작을 수행한다[38,39]. 이러한 선행연구는 선수들이 운동을 수행하는데 있어서 청-공간적 감각을 많이 사용하고 발달하였다는 것으로 판단할 수 있다.

본 연구의 결과를 작업기억에 기여하는 전전두엽(PFC)의 여러 하위 영역에 대한 두 가지 이론을 통해 다양한 관점에서 본 연구 결과를 해석할 수 있다.

첫 번째 관점은 ‘정보유형이론’(The type of information theory)이다 [40,41]. 이는 자극 범주에 따라 주도되는 하위 전문화를 지원한다. 이 이론에서는 Dorsolateral PFC는 공간 기억에 관여하고, Ventral area는 사물 정보의 기억에 관여하고, 시각을 담당하는 뇌의 후두엽 영역의 두 정보 과정 경로(two information-dependent processing pathways)에서 확장된 개념이다. 이 이론을 인용하면 우수한 운동수행능력을 갖고 있는 선수는 연습과 훈련으로 발달된 운동과 관련된 공간지각 능력이 일반적인 공간 자극에도 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있으며, 이를 통해 본 연구에서 반응속도와 전전두엽의 기능적 연결성에도 긍정적인 영향을 준 것이라 해석할 수 있다.

두 번째 관점은 ‘처리 유형 이론’(type of processing)이다. 이 이론은 원숭이 단일 대상(single unit) 연구를 통해 밝혀진 이론을 기반으로 주장되었으며[42], 이 모델에서는 기억 내용의 특성보다는 기억 내용을 모니터링하거나 조작해야 하는 정도에 따라 어떤 전두엽 영역이 활성화되는지 결정된다. 구체적으로 살펴보면, 전전두엽의 ventrolateral 영

역은 기억 내에서 정보의 능동적인 유지 및 보수를 담당하고, dorsolateral 영역은 기억 내에서 추가적인 모니터링과 조작이 필요할 때 활성화된다고 밝혔다. Fig. 4를 보면 1-back 과제 수행 시 우수선수의 경우 다른 두 집단에 비해 전전두엽의 기능적 연결성이 약하게 나타났으나 반응은 더 빠르게 한 것으로 나타났다. 과제 난이도가 낮을 경우에 전전두엽 각각의 영역에서의 연결 없이 수행을 원활하게 하며, 인지적 부하가 오는 과제의 경우에는 효율적인 기능적 연결을 통해 과제를 효율적으로 수행한다는 것으로 판단할 수 있다.

이와 관련하여 Smith [25]의 연구에서는 지속적인 주의 집중을 할 때 관련이 있는 것으로 밝혀진 뇌 연결의 수가 많다는 것은 의미가 있으며, 이는 성공적인 수행을 위해서 많은 뇌 영역들이 연결이 되어 있다고 판단할 수 있는 근거이다.

본 연구에서는 세계적인 기량을 가지는 선수들의 전전두엽의 차이를 밝히기 위하여 전전두엽의 연결성과 전전두엽의 48ch 영역에서의 혈류량의 차이를 살펴보았다. 선행연구에서는 대뇌의 구조적 네트워크와 기능적 네트워크는 동일한 구획체계(same parcellation scheme)를 공유할 경우에 의미 있게 차이를 비교할 수 있다고 하였다[43].

본 연구는 우수한 경기 능력을 가진 선수들이 청-공간적 작업기억 수행에 있어서도 선수와 비선수 보다 전전두엽의 기능적 통합 능력이 뛰어난 것을 알 수 있으며, 전전두엽의 구조적이고 효과적인 네트워크는 높은 과제 효율성을 가져 온다는 선행연구의 결과를 지지한다[44].

결론 및 제언

본 연구를 종합하여 도출한 결론은 다음과 같다.

첫째, 우수한 능력을 갖고 있는 운동선수는 일반선수와 비선수보다 일반적인 청-공간적 작업기억 능력이 우수하다는 것을 행동반응결과를 통해 알 수 있었다. 우수선수가 다른 두 집단보다 1-back, 2-back 과

제 모두에서 빠른 반응시간을 보였다.

둘째, 청-공간적 작업기억 과제 수행 시 우수한 능력을 갖춘 선수들과 두 집단에서 혈액학적 차이가 나타났다. 1-back 과제와 2-back 과제 수행 시 우수선수 집단은 다른 두 집단보다 전전두엽에서 기능적 연결성이 강하게 나타났으며, 이는 청-공간적 작업기억 과제를 수행하는데 있어서 전전두엽을 효율적으로 사용한다는 것으로 판단할 수 있다. 이러한 결과는 운동선수가 가지는 운동능력 뿐만 아니라 운동수행에서 필요한 작업기억이 수행에 필수적 요소라는 것으로 판단할 수 있으며, 선수들을 위한 가이드라인을 제시하는데 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

이러한 연구결과를 토대로 다음과 같은 제언을 한다.

본 연구는 전전두엽의 기능적 연결성을 확인한 연구이다. 이런 결과를 토대로 실제 운동과 관련된 영역인 운동영역과 보조운동영역 그리고 시각을 담당하는 시각피질과의 연결성을 확인한 다면 우수한 선수들의 뇌의 효율성을 밝히는데 도움이 될 것이라 판단된다.

CONFLICT OF INTEREST

이 논문 작성에 있어서 어떠한 조직으로부터 재정을 포함한 일체의 지원을 받지 않았으며, 논문에 영향을 미칠 수 있는 어떠한 관계도 없음을 밝힌다.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization: TS Chang; Data curation: TS Chang; Formal analysis: SJ Youn; Methodology: TS Chang, SJ Youn; Visualization: SJ Youn; Writing-original draft: TS Chang; Writing-review & editing: SJ Youn.

ORCID

Tai-Seok Chang <https://orcid.org/0000-0003-4490-2535>
Seo-Jin Youn <https://orcid.org/0000-0003-1019-258X>

REFERENCES

1. Yarrow K, Brown P, Krakauer JW. Inside the brain of an elite athlete: The neural processes that support high achievement in sports. *Nat Rev Neurosci*. 2009;10:585-96.
2. Rioult-Pedotti MS, Friedman D, Donoghue JP. Learning-induced LTP in neocortex. *Science*. 2000;290:533-6.
3. Kleim JA, Barbay S, Cooper NR, Hogg TM, Reidel CN, et al. Motor learning-dependent synaptogenesis is localized to functionally reorganized motor cortex. *Neurobiol Learn Mem*. 2002;77(1):63-77.
4. Moris S, Ohtani Y, Imanaka K. Reaction times and anticipatory skills of karate athletes. *Hum Mov Sci*. 2002;21(2):213-30.
5. Basten U, Hilger K, Fiebach CJ. Where smart brains are different: a quantitative meta-analysis of functional and structural brain imaging studies on intelligence. *Intelligence*. 2015;51:10-27.
6. Neubauer AC, Fink A. Intelligence and neural efficiency. *Neurosci Biobehav Rev*. 2009;33(7):1004-23.
7. Buszard T, Masters RSW, Farrow D. The generalizability of working memory capacity in the sport domain. *Curr Opin Psychol*. 2017;16:54-7.
8. Baddeley A. Working memory: looking back and looking forward. *Nat Rev Neurosci*. 2003;4(10):829-39.
9. Kane MJ, Bleckley MK, Conway ARA, Engle RW. A controlled-attention view of working memory capacity. *J Exp Psychol Gen*. 2001;130(2):169-83.
10. Wood G, Vine SJ, Wilson MR. Working memory capacity, Controlled attention and aiming performance under pressure. *Psychol Res*. 2016;80(4):510-7.
11. Anguera JA, Bernard JA, Jaeggi SM, Buschkuhl M, Benson BL, et al. The effects of working memory resource depletion and training on sensorimotor adaptation. *Behav Brain Res*. 2012;228(1):107-15.
12. Langan J, Seidler RD. Age differences in spatial working memory contributions to visuomotor adaptation and transfer. *Behav Brain Res*. 2011;225(1):160-8.
13. McCarthy G, Blamire AM, Puce A, Nobre AC, Bloch, G, et al. Functional magnetic resonance imaging of human prefrontal cortex activation during a spatial working memory task. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 1994;91(18):8690-4.
14. Courtney SM, Ungerleider LG, Keil K, Haxby JV. Object and spatial visual working memory activate separate neural systems in human cortex. *Cereb cortex*. 1996;6(1):39-49.
15. Smith EE, Jonides J, Koeppe RA, Awh E, Schumacher EH, et al. Spatial versus object working memory: PET investigations. *J Cogn Neurosci*. 1995;7(3):337-56.
16. Dieler AC, Tupak SV, Fallgatter AJ. Functional near-infrared spectroscopy for the assessment of speech related tasks. *Brain Lang*. 2012;121(2):90-109.
17. Basso Moro S, Bisconti S, Muthalib M, Spezialetti M, Cutini S, et al. A

- semi-immersive virtual reality incremental swing balance task activates prefrontal cortex: a functional near-infrared spectroscopy study. *Neuroimage*. 2014;85:451-60.
18. Fox MD, Raichle ME. Spontaneous fluctuations in brain activity observed with functional magnetic resonance imaging. *Nat Rev Neurosci*. 2007;8(9):700-11.
19. Ferrari M, Quaresima V. A brief review on the history of human functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) development and fields of application. *Neuroimage*. 2012;63(2):921-35.
20. Nagdyman N, Fleck TPK, Ewert P, Abdul-Khaliq H, Redlin M, et al. Cerebral oxygenation measured by near-infrared spectroscopy during circulatory arrest and cardiopulmonary resuscitation. *Br J Anaesth*. 2003;91(3):438-42.
21. Obrig H, Villringer A. Beyond the visible—imaging the human brain with light. *J Cereb Blood flow Metab*. 2003;23(1):1-18.
22. Taga G, Asakawa K, Maki A, Konishi Y, Koizumi H. Brain imaging in awake infants by near-infrared optical topography. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2003;100(19):10722-7.
23. Duan L, Zhang YJ, Zhu CZ. Quantitative comparison of resting-state functional connectivity derived from fNIRS and fMRI: a simultaneous recording study. *Neuroimage*. 2012;60(4):2008-18.
24. Sasai S, Homae F, Watanabe H, Sasaki AT, Tanabe HC, et al. A NIRS-fMRI study of resting state network. *Neuroimage*. 2012;63(1):179-93.
25. Smith, S. Linking cognition to brain connectivity. *Nat Neurosci*. 2016;19(1):7-9.
26. Biswal B, Yetkin FZ, Haughton VM, Hyde JS. Functional connectivity in the motor cortex of resting human brain using echo-planar MRI. *Magn Reson Med*. 1995;34(4):537-41.
27. The prefrontal cortex: Anatomy, physiology, and neuropsychology of the frontal lobe (2nd ed). New York: Raven Press 1989.
28. Racz FS, Mukli P, Nagy Z, Eke A. Increased prefrontal cortex connectivity during cognitive challenge assessed by fNIRS imaging. *Biomed Opt Express*. 2017;8(8):3842-55.
29. Rubinov M, Sporns O. Complex network measures of brain connectivity: uses and interpretations. *Neuroimage*. 2010;52(3):1059-69.
30. Hoshi Y, Kobayashi N, Tamura M. Interpretation of near-infrared spectroscopy signals: a study with a newly developed perfused rat brain model. *J Appl Physiol*. 2001;90(5):1657-62.
31. Strangman G, Culver JP, Thompson JH, Boas DA. A quantitative comparison of simultaneous BOLD fMRI and NIRS recordings during functional brain activation. *Neuroimage*. 2002;17(2):719-31.
32. Spierer DK, Petersen RA, Duffy K, Corcoran BM, Rawls-Martin T. Gender influence on response time to sensory stimuli. *J Strength Cond Res*. 2010;24(4):957-63.
33. Kane MJ, Engle RW. Working-memory capacity and the control of attention: The contributions of goal neglect, response competition, and task set to Stroop interference. *J Exp Psychol Gen*. 2003;132(1):47-70.
34. Conway ARA, Tuholski SW, Shisler RJ, Engle RW. The effect of memory load on negative priming: an individual differences investigation. *Mem Cognit*. 1999;27(6):1042-50.
35. Tuholski SW, Engle RW, Baylis GC. Individual differences in working memory capacity and enumeration. *Mem Cognit*. 2001;29(3):484-92.
36. Heitz RP, Engle RW. Focusing the spotlight: individual differences in visual attention control. *J Exp Psychol Gen*. 2007;136(2):217-40.
37. Wright MJ, Bishop DT, Jackson RC, Abernethy B. Cortical fMRI activation to opponents' body kinematics in sport-related anticipation: expert-novice differences with normal and point-light video. *Neurosci Lett*. 2011;500(3):216-21.
38. Carvo-Merino B, Glaser DE, Grèzes J, Passingham RE, Haggard P. Action observation and acquired motor skills: an fMRI study with expert dancers. *Cereb Cortex*. 2005;15(8):1243-9.
39. Carvo-Merino B, Grèzes J, Glaser DE, Passingham RE, Haggard P. Seeing or doing? Influence of visual and motor familiarity in action observation. *Curr Biol*. 2006;16(19):1905-10.
40. Goldman-Rakic PS. Cellular basis of working memory. *Neuron*. 1995;14(3):477-85.
41. Goldman-Rakic PS. The prefrontal landscape: implications of functional architecture for understanding human mentation and the central executive. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*. 1996;351(1346):1445-53.
42. Rainer G, Asaad WF, Miller EK. Selective representation of relevant information by neurons in the primate prefrontal cortex. *Nature*. 1998;393(6685):577-579.
43. Honey CJ, Sporns O, Cammoun L, Gigandet X, Thiran JP, et al. Predicting human resting-state functional connectivity from structural connectivity. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2009;106(6):2035-40.
44. Honey CJ, Kotter R, Breakspear M, Sporns O. Network structure of cerebral cortex shapes functional connectivity on multiple time scales. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2007;104(24):10240-5.