

우성과 비우성 손에서의 운동학습으로 나타나는 뇌 활성화 차이: fMRI 사례 연구



The Journal Korean Society of Physical Therapy

■ 박지원, 장성호¹

■ 대구가톨릭대학교 보건과학대학 물리치료학과, ¹영남대학교의료원 재활의학과

The Difference of Cortical Activation Pattern According to Motor Learning in Dominant and Non-dominant Hand: An fMRI Case Study

Ji-Won Park, PT, PhD; Sung-Ho Jang, MD¹

Department of Physical Therapy, College of Health Science, Catholic University of Daegu; ¹Department of Physical Medicine and Rehabilitation, College of Medicine, Yeungnam University

Purpose: Human brain was lateralized to dominant or non-dominant hemisphere, and could be reorganized by the processing of the motor learning. We reported four cases which showed the changes of the cortical activation patterns resulting from two weeks of training with the serial reaction time task.

Methods: Four right-handed healthy subjects were recruited, who was equally divided to two training conditions (right hand training or left hand training). They were assigned to train the serial reaction time task for two weeks, which should press the corresponding four colored buttons as fast as accurately as possible when visual stimulus was presented. Before and after two weeks of training, reaction time and function magnetic resonance image (fMRI) was acquired during the performance of the same serial reaction time task as the training.

Results: The reaction time was significantly decreased in all of subjects after training. Our fMRI result showed that widespread bilateral activation at the pre scanning was shifted toward the focused activation on the contralateral hemisphere with progressive motor learning. However, the bilateral activation was still remained during the performance of the non-dominant hand.

Conclusion: These findings showed that the repetitive practice of the serial reaction time task led to increase the movement speed and accuracy, as described by motor learning. Such motor learning induced to change the cortical activation pattern. And, the changed pattern of the cortical activation resulting from motor learning was different each other in accordance with the hand dominance.

Keywords: Motor learning, Serial reaction time task, Cortical activation, fMRI

논문접수일: 2009년 1월 28일

수정접수일: 2009년 3월 2일

게재승인일: 2009년 3월 11일

교신저자: 장성호, strokerehab@hanmail.net

1. 서론

인간의 행동은 유전자와 환경 사이의 상호작용에 의한 결과로 나타나며, 환경이 행동을 수정할 수 있는 가장 중요한 기전은 학습과 기억이라는 것은 잘 알려진 사실이다. 학습과 기억이란 세상의 모든 현상에 대한 지식을 습득하고 보유해가는 일련의

과정을 말하며, 그 중 인체의 동작에 대한 학습과 기억을 일컫는 운동학습은 일상생활을 수행하는데 있어 매우 중요한 요소이다.¹ 운동학습이란 반복적인 연습과 경험을 통해 특정한 운동 기술을 습득하고, 상대적으로 영구적인 기간 동안 그 운동 기술을 보유하고 필요한 시점에 적절하게 응용 및 사용할 수 있는 일련의 과정을 의미한다.^{1,3} 이러한 운동학습은 심리학 및 뇌신

경과학 등의 다양한 분야에서 오랜 기간 동안 연구되고 있는 분야이며, 그 응용 방법과 기전에 대한 이론적 근거를 바탕으로 인체의 정상 및 비정상적인 움직임과 치료 방법을 연구하는 물리치료 분야에서도 많은 연구가 이루어지고 있다.⁴⁹

운동학습으로 인한 기술의 습득과 수행 능력의 변화를 평가하기 위한 방법으로, 근전도를 이용한 근육의 협력 수축 과제 (coccontraction motor task)를 비롯하여 추적과제(tracking task), 균형과제, 연속반응시간과제 등 다양한 측정 방법들이 사용되고 있다.¹⁰⁻¹² 그 중 연속시간과제는 시각, 청각 등 여러 감각적 자극을 연속적으로 제시하고 이에 상응하는 운동반응을 유발하는데 걸리는 시간을 측정하는 과제로서, 운동학습으로 인한 지각운동 기술(perceptual motor skill)의 향상을 평가하는데 널리 사용되고 있으며, 반복적인 연습을 통한 반응시간의 단축은 운동학습의 결과를 의미한다. 연속적인 자극을 제시하는 방법 및 연습 방식으로 무선연습(random practice)와 구획연습(blocked practice)로 구분되는데, 무선연습은 연속적으로 제시되는 자극이 일련의 순서 없이 무작위 방식으로 훈련하는 것으로 운동 기술의 보유(retention)와 전이(transfer)가 구획연습에 비해 효과적이라는 것은 여러 행동학적 연구들에서 잘 입증되어 있다.^{8,13}

최근 운동학습으로 인한 세포 흥분성의 변화와 대뇌피질이 활성화되는 양성의 변화에 대해 경두개 자기 자극, 양전자 방출 단층 촬영, 기능적 자기공명영상 등의 뇌지도화 기법을 이용한 많은 연구가 진행되고 있다.¹⁴⁻¹⁷ 특히 기능적 자기공명영상은 방사선의 조사 없이 안전한 비침습적인 방법으로 반복적인 실험을 할 수 있으며, 뇌혈류량의 미세한 변화를 감지할 수 있는 시공간적 해상도가 우수한 도구로서, 심리 및 인지 기능, 운동 학습, 뇌 손상 후의 재조직화 등 다양한 영역에서 인간의 뇌 기능을 측정하는데 사용되고 있다.^{2,18}

한편, 대뇌반구의 비대칭성 및 우성 손잡이는 인간의 운동 기능에 있어서 필연적이다. Kawashima 등¹⁹은 양전자 방출 단층 촬영 기법을 통해 오른손잡이와 왼손잡이에서 같은 과제를 하는 동안에 활성화되는 양상이 서로 다르다고 하였고, Kwon 등²⁰은 좌측 뇌는 단순한 반복적인 동작에, 우측 뇌는 시지각 협응력이 필요로 하는 추적과제에 편측화되었다고 보고하였다. 이와 같이 우성과 비우성 손의 운동 기능은 엄연한 차이를 보이고 있으며, 관련된 뇌 신경 구조들을 기능적으로 서로 사용하고 있다.

현재 자기공명영상을 이용하여 운동학습에 따른 뇌 활성도의 변화를 연구한 논문은 많이 출판되어 있다. 하지만, 기능적 자기공명영상 촬영 시 고자기장으로 인한 금속 소재의 사용이 불가능하여 훈련과 동일한 검사 도구를 사용한 뇌 기능 평가가 어려운 실정이며, 우성과 비우성 뇌반구의 기능적 차이가 존재

함에도 불구하고, 이러한 요소가 운동학습으로 인한 뇌 활성화 양상에 어떠한 영향을 미치는지에 관한 연구는 많지 않다. 따라서 본 연구는 시열반응과제를 통해 운동학습의 따른 운동반응 시간의 변화와 이에 따른 뇌활성화되는 양상을 파악하며, 우성과 비우성 간의 학습되는 양상의 차이를 사례 비교하고자 한다.

II. 연구방법

1. 연구대상

본 연구에 참여한 대상자는 우성 손의 판별 검사인 Edinburg Handedness Inventory²¹에서 오른손잡이로 판명된 4명의 정상 성인이 참여하였고, 각각 2명의 오른손 훈련군과 2명의 왼손 훈련군으로 무작위 할당하였다. 대상자의 선별은 운동학습에 영향을 미칠 수 있는 학력 및 지적 수준을 동일하게 하기 위해 동일 대학교 동일 학과에 재학 중인 신경학적 이상 소견이 없는 학생을 대상으로, 최근 1년 이내에 운동학습에 관련된 실험 연구에 참여하거나, 피아노 연주와 타자 등과 같이 매일 반복적으로 손을 많이 사용하는 활동을 하는 자는 제외하였다. 모든 대상자는 연구의 목적과 실험 절차에 대해 충분히 이해하였고, 자발적인 동의를 한 후 연구에 참여하였다.

2. 실험방법

1) 연속반응과제의 측정 및 훈련 도구

Nissen & Bullemer²²에 의해 개발된 연속반응시간과제(serial reaction time task, SRTT)는 실험 목적에 따라 다양하게 구성할 수 있도록 상용화된 자극 제공 프로그램(SuperLab Pro version 2.04, Cedrus, US)과 제시된 자극에 상응하는 반응을 감지할 수 있도록 제작된 여덟 개의 버튼(좌측 4개, 우측 4개)으로 구성된 반응 패드(RB-830, Cedrus, US)를 컴퓨터(Thinkpad X61, Lenovo, US)에 연결하여 사용하였다. 연속반응시간 과제의 구성은 컴퓨터 화면의 중앙에 수평으로 된 4개의 분할된 사각 공간을 두고, “자극” 신호에 해당하는 별표(*)가 네 개의 공간 중에서 하나에만 제시되도록 하였고, 자극의 제시 시간은 400ms, 하나의 자극이 제시되었다가 사라진 후 다시 다른 자극이 나타나는데 걸리는 시간인 자극간 시간(interstimulus interval)은 400ms, 자극 하나당 전체 소요 시간은 800ms으로 하였고, 화면은 검은 바탕에 자극은 흰색, 화면에서의 공간 분할은 회색선을 이용하여 설계하였다. 제시된 자극에 대한 상응하는 반응 패드의 구성은 첫 번째 공간에서의 자극은 파랑, 두 번째 공간에서의 자극은 노랑, 세 번째 공간에서의 자극은 초록, 네 번째 공간에서의 자극은 빨강 버튼을 누르도록 하였다 (Figure 1).

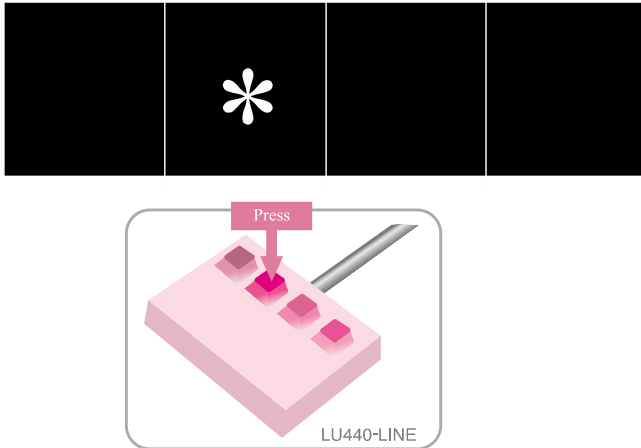


Figure 1. Configuration of task stimulation and response method using a paradigm and response pad.

2) 훈련 및 사전사후 측정 방법

대상자는 높이 조절이 가능한 의자에 바르게 앉아 책상 위 100cm 거리에 있는 눈높이 위치의 컴퓨터 화면을 보며, 팔꿈치 관절이 90° 굴곡될 정도로 반응 패드에 훈련하고자 하는 손을 가볍게 올려놓은 자세를 유지하도록 하였다. 위 자세에서 대상자는 네 가지 색깔로 구분된 반응 패드의 버튼들 위에, 엄지손가락을 제외한 두 번째에서 다섯 번째 손가락을 각각 순차적으로 올려놓고, 각각의 사각 공간에 나타나면 자극이 제시되면 이에 해당하는 버튼을 최대한 빨리 해당하는 버튼을 누르게 하도록 하였다. 연속반응시간과제는 훈련 방법은 네 가지의 자극이 무작위로 제시되도록 설정하여, 5분의 훈련 후 1분 동안의 휴식을 가지는 방식으로 하루 1시간 동안 훈련하도록 하였다. 훈련 기간은 주 당 5일, 2주 동안 10일간 훈련하였다.

본 과제의 훈련 효과에 대한 사전사후 측정 방법으로, 훈련 시 동일한 연속반응과제를 수행하는 동안에 기능적 자기공명영상을 촬영하였다. 자극에 대한 운동반응의 측정은 SuperLab Pro 프로그램을 이용하여, 정확도는 측정하는 동안 제시된 자극에 해당하는 버튼을 정확하게 누른 것을 추산하였으며, 반응 시간은 자극이 제시된 시점부터 반응키를 누르는데 까지 걸린 시간으로 하였다.

3. 기능적 자기공명영상의 촬영 및 분석

1) 촬영 방법

기능적 자기공명영상촬영 장치인 1.5T MR scanner(Gyrosan Intera System, Philips, German)안에 대상자를 편안히 누운 자세에서 머리를 움직이지 못하도록 고정하도록 하였다. SuperLab 프로그램에서 제시되는 자극은 촬영실 밖에서 유리로 된 창에 빔프로젝터를 투사하여 촬영실 내 150cm×100cm 크기

의 아크릴 판에 영상이 맺히도록 하였고, 대상자의 머리 코일에 거울을 부착하여 대상자가 누운 상태에서 350cm의 거리에 있는 아크릴 판의 영상을 볼 수 있도록 하였다. 대상자는 이렇게 제시된 자극에 대해 자기장의 영향을 받지 않고 정확한 전기적 신호를 컴퓨터에 전달해 줄 수 있으며, 기능적 자기공명영상에 영향을 미치지 않도록 제작된 반응 패드(LU440-LINE, Cedrus, US)를 편안한 위치에 두고 자극에 상응하는 색깔의 버튼을 누르도록 하였다. 연속반응시간과제는 훈련과 동일한 과제로 구성되었고, 30초의 수행기와 30초의 휴식기를 하나의 구획으로 총 4구획을 실시하는 동안 기능적 자기공명영상을 촬영하였다. 기능적 자기공명영상의 촬영 변수는 TR이 2100ms, TE는 50ms이었으며, Flip angle은 70°, Field of View(FOV)는 210ms이었다. 매트릭스 크기는 64×64, 뇌 절편 당 두께는 5ms이었다. 기능적 자기공명영상촬영에서는 한 개의 뇌 볼륨 당 20장의 뇌 절편을 얻었다. 기능적 자기공명영상촬영 후에는 T1 영상을 전교련(anterior commissure)과 후교련(posterior commissure) 연결선에 평행하게 수평면으로 20장의 뇌 절편을 얻었다. T1에 대한 자기공명영상의 촬영 변수는 TR이 940ms, TE가 15ms이었으며, 나머지 조건은 기능적 자기공명영상 촬영의 변수와 같았다.

2) 분석방법

얻어진 자료는 MATLAB(Mathworks Inc., USA) 환경에서 구현되는 SPM 2(Statistical Parametric Mapping 2 version, Wellcome Department of Cognitive Neurology, UK) software로 분석하였다. 분석절차는 머리의 움직임 보정하기 위한 재배열(realignment)을 하였으며 각 피험자의 T1 MRI 영상에 재배열 절차에서 생성된 mean-image와 EPI 영상을 상관정렬(coregister) 하였다. 이어서 EPI 영상과 T1 영상을 T1 template에 맞추는 공간표준화(normalize) 작업을 하였다. 표준화된 영상은 8mm의 FWHM(full width of half maximum)을 갖는 Gaussian kernel filter를 적용하여 편평화(smoothing) 하였다. 이렇게 처리된 결과를 바탕으로 BOLD 신호의 변화를 얻기 위하여 실험조건과 비교조건을 감산(subtraction)하였으며, 분석에서 실험조건은 활성화과제 구획(수행기)으로 비교조건은 대조과제(휴식기) 구획으로 하였다. 조건 간의 비교 시 반복제시에 따른 과제 효과와 혈역학반응함수(hemodynamic response function: hrf)에 대한 선형모델을 적용하였다. 모델의 구성 시 저주파 잡음(noise)은 high-pass filter를 이용하여 제거하였으며, 조건들의 반복제시에 의한 혈역학반응함수의 효과는 주파수의 low-pass filter로 제거하였다. 이렇게 구성된 모델과 영상 처리된 결과는 ANCOVA를 이용하여 통계 분석하였다. 본 연구의 결과 분석은 고정효과모델(fixed effect model)을 이용하여 통계

Table 1. The changes of reaction time before and after training in the serial reaction time task

	Number	Sex/Age	Serial Reaction Time (ms)		
			pre	Post	difference
Lt. Side Training	S1	F/22	427	275	152
	S2	F/21	402	250	152
Rt. Side Training	S3	F/21	384	204	180
	S4	M/21	357	192	165
			392.50±14.76	230.25±19.46	162.25±6.66

역치를 부피소 수준에서 정하였으며, 높이역치(height threshold)를 corrected p 값이 0.05보다 낮은 수준에서, 범위역치(extent threshold)는 부피소 5개를 기준으로 활성 지도를 얻었다. 이는 생리학적으로 유의미한 결과를 적어도 유의미한 부피소가 5개 이상 있을 경우 활성이 된 것으로 가정하고 통계적 유의성을 검증한 것으로, 각 활성의 p 값은 부피소의 높이역치와 범위역치의 상호작용에 의하여 계산하였다. 관심영역은 일차감각운동 피질(primary sensory-motor cortex, SM1), 전운동영역(pre-motor area), 보조운동영역(supplementary motor area, SMA), 전두엽(frontal lobe), 두정엽(parietal lobe)으로 설정하였다.

III. 결과

1. 훈련 전후의 반응시간

왼손 훈련군의 대상자 1과 대상자 2는 각각 훈련 전 427ms,

402ms에서 훈련 후 275ms, 250ms로 반응시간이 152ms, 152ms으로 단축되었으며, 오른손 훈련군의 대상자 3과 대상자 4는 각각 훈련 전 384ms, 357ms에서 훈련 후 204ms, 192ms으로 반응시간이 180ms, 165ms으로 단축되었다. 모든 대상자의 평균 반응시간(평균±표준오차)은 훈련 전 392.50±14.76ms에서 훈련 후 230.25±19.46ms로 162.25±6.66ms의 변화를 보였다(Table 1).

2. 훈련 전후의 뇌 활성화

기능적 자기공명 영상을 분석한 결과, 대상자 1에서 훈련 전 양측 뇌반구의 일차감각운동영역, 전운동영역, 두정엽에서 활성도를 보였고, 훈련 후 양측 일차감각운동영역, 양측 전운동영역, 양측 두정엽, 좌측 운동보조영역에서 활성도를 보였다. 대상자 2에서 양측 뇌반구의 일차감각운동영역, 전운동영역, 두정엽에서 활성도를 보였고, 훈련 후 우측 일차운동영역, 양측 전운동영역, 우측 운동보조영역, 우측 두정엽에서 활성도를 보였다.

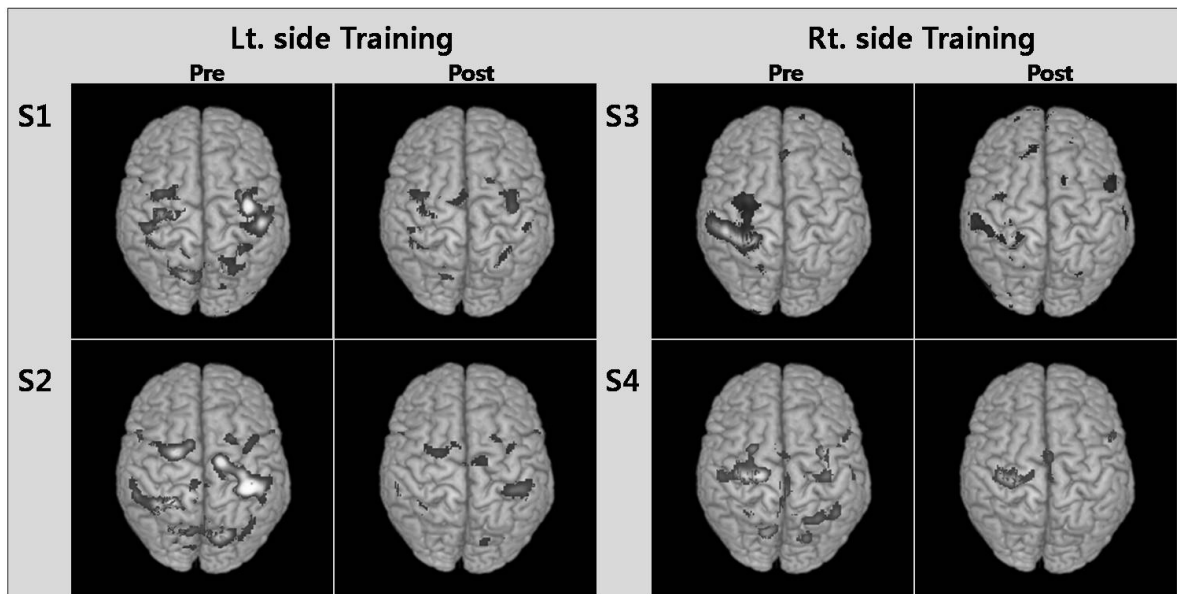


Figure 2. The cortical activation by the serial reaction time task before and after training in each of subjects. S1: subject 1.

대상자 3에서 훈련 전 좌측 뇌반구의 일차운동영역, 전운동영역, 두정엽에서 활성도를 보였고, 훈련 후 좌측 일차운동영역, 양측 전운동영역에서 활성도를 보였다. 대상자 4에서는 훈련 전 양측 뇌반구의 일차운동영역, 전운동영역, 운동보조영역, 두정엽에서 활성도를 보였으며, 훈련 후 좌측 일차운동영역, 우측 전운동영역, 양측 운동보조영역에서 활성도를 보였다. 모든 대상자에서 훈련 후 일차운동영역을 비롯한 모든 운동관련영역에서 감소된 활성도를 보였다(Figure 2).

IV. 고찰

본 연구는 우성과 비우성 손에서 연속반응시간과제의 반복적인 훈련으로 인한 운동학습의 효과를 반응시간 및 이에 따른 뇌활성화의 변화된 양상을 관찰하기 위해 설계되었다. 연속반응시간과제는 암묵적 운동학습의 효과를 검사할 수 있는 뇌과학 분야에서 가장 널리 사용되는 훈련 및 측정 과제이며,⁸ 기능적 자기공명영상은 인지 및 운동 과제의 수행에 따른 뇌신경의 활성도의 국소적인 뇌 혈류와 산소 소비의 민감한 변화를 높은 해상도를 가진 영상으로 구현할 수 있는 장점을 가진 뇌지도화 기법이므로,¹⁸ 우리는 연속반응시간과제를 수행하는 동안 기능적 자기공명영상을 획득하였다. 운동학습 전의 연속반응과제에서 오른손의 운동반응시간이 왼손에 비해 비교적 빠른 편을 보였고 훈련으로 인한 반응속도의 변화에서도 더 큰 변화를 보였으며, 훈련 후 우성 및 비우성 모두에서 운동학습으로 인해 운동반응시간이 훈련 전과 비교하여 평균 $162 \pm 6.66\text{ms}$ 빨라진 결과를 보였다. 이는 우성 손의 운동 기능이 비우성 손에 비해 더욱 빠르고 정확하며,^{20,23,24} 반복적인 연습은 정확도와 운동수행 속도 등 여러 운동 기능의 수행 능력을 향상시킬 수 있다는 여러 선행 연구와 같은 결과를 보였다.^{12,25,26} 또한 기능적 자기공명영상에서 뇌활성도의 결과는 일차운동영역을 비롯한 전운동영역, 운동보조영역, 두정엽에서 활성도를 보였고, 훈련 후 모든 운동관련영역에서 감소된 활성도를 보였다. 이러한 결과는 2주 동안 연속반응과제의 반복적인 훈련으로 운동학습이 유발되었고, 이로 인해 뇌활성도의 양상이 변화하여 뇌 재조직화가 유발되었다고 생각된다.

기능적 자기공명영상을 이용하여 운동학습에 따른 신경생리학적 양상을 보고자 하는 연구들은 크게 고도로 학습된 숙련자와 초보자의 과제 수행 시 나타나는 대뇌피질의 활성화되는 양상을 비교한 연구와 반복적인 훈련으로 인한 뇌신경 회로의 재조직화에 관한 연구로 나눌 수 있다. 숙련된 학습자에서 나타나는 뇌 활성화 양상의 연구에서, Lotze 등²⁷은 프로 바이올린 연주자와 아마추어 연주자가 바이올린 협주곡을 연주하는 동작을

수행하는 동안 자기공명영상을 획득하여 비교한 결과, 프로 연주자에서 더 높은 진폭의 근전도 신호를 보였고 반대측 일차운동각영역, 양측 상부 두정엽, 동측 소뇌에서 보다 국소적인 활성도를 보였다고 보고하였다. 또한 실제 수행하지 않고, 그 동작을 상상하는 과제를 수행하는 동안에서도 이와 비슷한 결과를 보였다고 하였다. 이는 프로 연주자의 지속적이고 반복적인 훈련이 유사한 과제를 수행하는데 있어서 적은 노력으로 보다 효율적으로 뇌를 사용하였다고 할 수 있다.

반복적인 훈련을 통한 운동학습의 연구에서는 연속반응시간과제, 추적과제를 비롯한 등척성 근육 조절이나 여러 근육을 동시 다발적으로 활성화하는 과제를 통해 뇌 활성화의 특성 또는 변화 양상을 관찰하였다.^{12,25,26,28,29} 그 결과, 대체적으로 운동학습의 초기에는 일차감각운동영역을 포함한 전두엽, 전운동영역, 보조운동영역, 두정연합영역(associational parietal area) 등 많은 영역에서 활성도를 보이다가, 후기에는 자동적인 숙련된 움직임 보이면서 그 활성도가 점점 감소하는 경향을 보인다고 하였다. 특히 Muller 등²⁹은 연속반응과제 훈련을 통한 운동학습의 초기 단계에서는 시각적 자극에 대한 외현적이고 순차적인 학습에 관여하는 시각영역과 위쪽 두정엽이 중요한 역할을 하고, 학습의 후기에는 전전두엽(prefrontal area)과 내측두엽(mediotemporal area)가 결정적인 역할을 한다고 하였다. 또한 Grafton 등²⁸은 시지각 추적과제(visuomotor tracking task)의 훈련을 통해 운동 기술 습득에 중요한 역할을 하는 두 가지 요소인 앞먹임(feedforward)와 되먹임(feedback)을 관찰하는 뇌 영역을 연구하였는데, 선행적인 운동 명령을 유추하거나 수행하는 앞먹임에 중요한 역할을 하는 뇌 영역은 뒤쪽 전운동영역, 아래쪽 두정엽, 보조운동영역, 띠이랑 운동 영역(cingulate motor cortex)이며, 되먹임 조절에 관여하는 뇌 영역은 양측 뒤위 두정엽(posterior superior parietal cortex), 우측 앞쪽 전운동영역의 뇌 활성화와 관련이 있다고 하였다. 이러한 뇌 활성도의 변화와 차이는 운동 기술의 숙련도, 즉 학습의 정도에 따라 동일한 과제를 수행하는데 사용되는 뇌의 영역과 범위가 다르며, 신경 세포 활동의 효율성이 달라진다는 것을 의미한다고 볼 수 있다.

한편, 우성과 비우성 손에서는 움직임의 정확도와 수행 속도 등과 같이 운동수행능력에서 차이가 있을 뿐 아니라 좌우측 대뇌반구의 우성화(hemispheric dominance)와 기능적 대칭성(functional asymmetry)으로 설명되는 뇌 신경회로에서 해부학적 또는 기능적으로 좌우측에 차이가 존재한다. Triggs 등³⁰은 각 30명씩의 왼손 및 오른손잡이를 대상으로 경두개 자기자극 실험을 통해, 오른손잡이에서의 운동유발 역치(motor evoked potentials)가 상대적으로 더 낮은 결과를 보여 좌우측 운동신경 경로의 신경전달 속도가 서로 차이가 있음을 발견하였다. 또

한 Kim 등³⁾은 오른손 및 왼손잡이 15명을 대상으로 반복적인 대립 운동을 수행하는 동안 기능적 자기공명영상을 촬영하여 뇌활성도의 차이를 관찰하였는데, 오른손잡이에서는 수행하는 손의 반대쪽 뇌반구에서 활성화가 나타났지만, 왼손잡이에서는 동측을 포함한 양측 뇌반구에서 활성화가 나타났다고 하였다. 이러한 선행연구들과 같이 본 연구 결과에서도 우측 손에서의 운동학습으로 인한 뇌활성화의 변화 양상이 국소적인 활성도가 감소하거나, 양측성에서 편측으로 집중화된 결과를 보였고, 좌측 손에서의 경우에는 편측화 현상되는 경향을 보일지라도 양측 뇌반구에서 모두 활성화되는 양상을 보였다. 이러한 결과는 비우성 손에서의 운동 수행 능력이 우성 측에 비해 상대적으로 떨어져 있어 좌우측 손에서의 기능적 차이일 수 있으며, 또한 우성과 비우성 뇌반구의 기능적 대칭성이 여전히 존재하고 있기 때문일 수 있다고 생각된다.

운동학습으로 인한 운동기술의 습득과 이에 따른 뇌 활성도의 변화는 운동 과학(movement science)과 뇌신경과학 분야에서 다루어지는 주요한 이슈이며, 이에 대한 이론적 근거를 바탕으로 정상적인 인체의 동작을 이해하고 나아가 비정상적 동작에 대한 평가와 치료적 중재를 모색해야 하는 물리치료 영역에서 그 관심도가 증가하고 있다. 따라서 본 연구는 우성과 비우성 손에서 연속반응과제의 반복적인 훈련으로 인한 운동학습이 뇌 활성화에 어떠한 영향을 미치는지를 관찰하고자 하였고, 훈련과제와 동일한 과제를 수행하는 동안 기능적 자기공명영상을 수집하여 뇌 기능의 편측화와 좌우측 운동 능력의 차이에 관한 실험을 수행하였다. 이러한 연속반응시간과제를 기능적자기공명영상과 함께 측정할 수 있는 실험 환경의 구축은 운동학 및 뇌신경학적 자료를 동시 수집할 수 있어 향후 운동학습의 영역 뿐 아니라, 다양한 정량화된 운동 과제에 따른 뇌 활성도를 측정할 수 있는 토대가 될 것으로 여겨진다. 그러나 더 많은 대상자를 수집하여 우성과 비우성에서 운동학습 시 변화되는 뇌 활성도의 차이를 통계적 방법으로 일반화(generalization) 하는 것이 필요하며, 특히 대뇌피질과 피질하 주변에서의 변화 등 다양한 영역에서의 변화 양상에 대한 연구가 이루어질 것을 기대한다.

V. 결론

본 연구는 우성과 비우성 손에서 연속반응과제의 반복적인 훈련을 통해, 운동학습의 따른 운동반응시간의 변화와 이에 따른 뇌활성화되는 양상을 파악하고자 하였다. 그 결과 우성 및 비우성 모두에서 운동학습으로 인해 운동반응시간이 훈련 전과 비교하여 빨라졌으며, 뇌 활성도의 변화에서는 일차운동영역을

비롯한 전운동영역, 운동보조영역, 두정엽에서 활성도를 보였고, 훈련 후, 모든 운동관련영역에서 감소된 활성도를 보였다. 특히 우측 손에서의 운동학습으로 인한 뇌 활성화의 변화 양상이 국소적인 활성도가 감소하거나, 양측성에서 편측으로 집중화된 결과를 보였고, 좌측 손에서의 경우에는 편측화 현상되는 경향을 보일지라도 양측 대뇌반구에서 모두 활성화되는 양상을 보였다. 이는 연속반응시간과제의 반복적인 훈련으로 운동학습이 유발되었고, 이로 인해 뇌 활성도의 양상이 변화하여 뇌 재조직화가 유발되었다고 생각된다.

Author Contributions

Research design: Park JW, Jang SH

Acquisition of data: Park JW

Analysis and interpretation of data: Park JW

Drafting of the manuscript: Park JW

Administrative, technical, and material support: Jang SH

Research supervision: Park JW, Jang SH

참고문헌

1. Shumway-Cook A, Woollacott MH. Motor control; theory and practical applications. Baltimore, Lippincott Williams & Wilkins, 2001.
2. Kandel E, Schwartz J, Jessell T. Principles of neural science. Internation Edition, Mcgraw-Hill, 2000.
3. Leonard C. The neuroscience of human movement. St. Louis, Mosby, 1998.
4. Forkstam C, Petersson KM. Towards an explicit account of implicit learning. Curr Opin Neurol. 2005;18(4):435-41.
5. Kim JH, Kim CS. Effects of virtual reality program on standing balance in chronic stroke patients. J Kor Soc Phys Ther. 2005;17(3):351-67.
6. Park JM, Kim CS. The effect of virtual reality program in chronic stroke patients. J Kor Soc Phys Ther. 2004; 16(4):687-98.
7. Jackson PL, Lafleur MF, Malouin F et al. Functional cerebral reorganization following motor sequence learning through mental practice with motor imagery. Neuroimage. 2003;20(2):1171-80.
8. Schmidt RA. Motor control and learning. Champaign, IL, Human Kinetics Publishers, 2005.
9. Van Der Graaf FH, De Jong BM, Maguire RP et al. Cerebral activation related to skills practice in a double serial reaction time task: Striatal involvement in random-order sequence

- learning. *Brain Res Cogn Brain Res*. 2004;20(2):120-31.
10. Gautier G, Thouvarcq R, Larue J. Influence of experience on postural control: Effect of expertise in gymnastics. *J Mot Behav*. 2008;40(5):400-8
 11. Kwon YH, Chang JS, Hong JH et al. Motor skill learning through mental imagery training with serial reaction time task. *The Journal of Korean Society of Occupational Therapy*. 2007;15(1):57-65.
 12. McNamara A, Tegenthoff M, Dinse H et al. Increased functional connectivity is crucial for learning novel muscle synergies. *Neuroimage*. 2007;35(3):1211-8.
 13. Park JW, Kwon YH, Lee MY. Different brain activations between random and blocked practice in motor learning. *Journal of Korea Sport Research*. 2007;18(5):469-80.
 14. Choi JH, Kwon YH. Medial reorganization of primary motor cortex in patient with traumatic brain injury: A fMRI case study. *J Kor Soc Phys Ther*. 2005;17(3):421-8.
 15. Kim YH, You SH, Ko MH et al. Repetitive transcranial magnetic stimulation-induced corticomotor excitability and associated motor skill acquisition in chronic stroke. *Stroke*. 2006;37(6):1471-6.
 16. Krakauer JW, Pine ZM, Ghilardi MF et al. Learning of visuomotor transformations for vectorial planning of reaching trajectories. *J Neurosci*. 2000;20(23):8916-24.
 17. Xiong J, Ma L, Wang B et al. Long-term motor training induced changes in regional cerebral blood flow in both task and resting states. *Neuroimage*. 2009;45(1):75-82.
 18. Cramer SC, Bastings EP. Mapping clinically relevant plasticity after stroke. *Neuropharmacology*. 2000;39(5):842-51.
 19. Kawashima R, Inoue K, Sato K et al. Functional asymmetry of cortical motor control in left-handed subjects. *Neuroreport*. 1997;8(7):1729-32.
 20. Kwon YH, Kim CS, Jang SH. Ipsi-lesional motor deficits in hemiparetic patients with stroke. *NeuroRehabilitation*. 2007;22(4):279-86.
 21. Oldfield RC. The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*. 1971;9(1):97-113.
 22. Nissen MJ, Bullemer P. Attentional requirements of learning: Evidence from performance measures. *Cognitive Psychology*. 1987;19(1):1-32.
 23. Brown GG, Caligiuri M, Meloy MJ et al. Functional brain asymmetries during visuomotor tracking. *J Clin Exp Neuropsychol*. 2004;26(3):356-68.
 24. Vuillermot S, Pascatore A, Holper L et al. An extended drawing test for the assessment of arm and hand function with a performance invariant for healthy subjects. *J Neurosci Methods*. 2009;177(2):452-60.
 25. Floyer-Lea A, Matthews PM. Distinguishable brain activation networks for short- and long-term motor skill learning. *J Neurophysiol*. 2005;94(1):512-8.
 26. Schwarb H, Schumacher EH. Neural evidence of a role for spatial response selection in the learning of spatial sequences. *Brain Res*. 2009;1247:114-25.
 27. Lotze M, Scheler G, Tan HR et al. The musician's brain: Functional imaging of amateurs and professionals during performance and imagery. *Neuroimage*. 2003;20(3):1817-29.
 28. Grafton ST, Schmitt P, Van Horn J et al. Neural substrates of visuomotor learning based on improved feedback control and prediction. *Neuroimage*. 2008;39(3):1383-95.
 29. Muller RA, Kleinhans N, Pierce K et al. Functional MRI of motor sequence acquisition: Effects of learning stage and performance. *Brain Res Cogn Brain Res*. 2002;14(2):277-93.
 30. Triggs WJ, Calvanio R, Macdonell RA et al. Physiological motor asymmetry in human handedness: Evidence from transcranial magnetic stimulation. *Brain Res*. 1994;636(2):270-6.
 31. Kim SG, Ashe J, Hendrich K et al. Functional magnetic resonance imaging of motor cortex: Hemispheric asymmetry and handedness. *Science*. 1993; 261(5121):615-7.