

시열반응과제의 운동학습이 대뇌피질 활성화의 변화에 미치는 영향



The Journal Korean Society of Physical Therapy

■ 권용현, 장종성¹, 김종선²

■ 영남이공대학 물리치료학과, ¹대구대학교 대학원 재활과학과, ²대구대학교 재활과학대학 물리치료학과

Changes of Cortical Activation Pattern Induced by Motor Learning with Serial Reaction Time Task

Yong-Hyun Kwon, PT, PhD; Jong-Sung Chang, PT, MS¹; Chung-Sun Kim, PT, PhD²

Department of Physical Therapy, Yeungnam College of Science & Technology; ¹Department of Rehabilitation Science, Graduate School, Daegu University; ²Department of Physical Therapy, College of Rehabilitation Science, Daegu University

Purpose: Numerous investigators demonstrated that adaptative changes were induced by motor skill acquisition in the central nervous system. We investigated the changes of neuroelectric potential following motor learning with serial reaction time task in young healthy subjects, using electroencephalography (EEG).

Methods: Twelve right-handed normal volunteers were recruited, who have no history of neurological dysfunction and were given to written the informed consent. All subjects were assigned to flex to extend the wrist joint or flex the thumb for pressing the matched button as quickly and accurately as possible, when one of five colored lights was displayed on computer screen (red, yellow, green, blue, white). EEG was measured, when five types simulations were presented randomly with equal probabilities of 20% in total 200 times at the pre and post test. And they were scheduled for 30 minutes practice session during two consecutive days in the laboratory.

Results: The results showed that the reaction time at the post test was significantly reduced, compared to one of the pre test in serial reaction time task. In EEG map analysis, the broaden bilateral activation tended to be changed to the focused contralateral activation in the frontoparietal area.

Conclusion: These findings showed that acquisition of motor skill led to product more fast motor execution, and that motor learning could change cortical activation pattern, from the broaden bilateral activation to the focused contralateral activation. Thus we concluded that the adaptative change was induced by motor learning in healthy subjects.

Keywords: EEG, Motor learning, Serial reaction time task

논문접수일: 2009년 2월 16일

수정접수일: 2009년 3월 6일

게재승인일: 2009년 3월 9일

교신저자: 김종선, chskim@daegu.ac.kr

1. 서론

운동학습은 반복적인 연습과 경험을 통해 새로운 동작과 그에 대한 운동 기술을 습득하여 숙련된 수행에 필요한 역량을 비교적 영구적으로 변화시키는 일련의 과정을 말하며, 행동의 단순한 변화만을 언급하는 것은 아니라 기술 습득에 대한 역량을 최대화하여 특별한 상황에서 능숙하게 움직임을 유발하는 증가

된 역량을 말한다.^{1,2} 현재까지 인지심리학, 스포츠심리학, 뇌과학을 비롯하여, 물리치료분야에서 움직임에 대한 본연의 내적 처리 과정을 이해하기 위해 많은 노력을 기울이고 있다.^{3,5}

운동학습의 효과와 여러 변수를 입증하기 위한 많은 연구들에서 다양한 측정 도구가 사용되고 있는데, 그 중 연습의 양, 피로도의 종류와 계획 등, 운동학습에 영향을 미치는 요소에 대해 파악하고, 내잠적 지식과 명시적 지식의 학습을 구분하기 위

해 시열 반응 과제가 많이 사용된다. 특히 인지 과학 분야에서 가장 널리 쓰이는 운동 과제 중의 하나로, 무작위 설계(random design)와 구획 설계(block design)를 연구 목적에 따라 선택적으로 사용하여, 절차 학습(procedural learning)의 효과를 검사할 수 있다.⁴ 시열 반응 과제(serial reaction time task)는 수행자에게 설정된 자극을 제시하고, 이에 해당하는 운동 반응을 검사하는 것으로 운동 반응 시간을 측정하여 운동학습으로 인한 반응시간의 단축을 측정하게 된다. 현재 신경과학 및 인지 과학 분야에서 시열 반응 과제를 이용하여, 정상인뿐만 아니라 다양한 뇌손상을 가진 환자들의 기억과 인지, 운동학습에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.^{6,8}

운동 기술을 습득하는 동안에 움직임의 속도와 정확성이 증가되어, 자동화(automaticity)와 적응력(adaptability)이 발생되며, 이러한 행동학적 변화는 운동학습으로 인한 뇌 기능의 변화에 의해 유발된다.^{9,10} 최근 뇌지도화 기법의 발전으로, 기능적 자기공명영상, 양전자방출단층촬영, 경두부 자기자극, 경두개 자기자극(transcranial magnetic stimulation), 확산 텐서 경로영상(diffusion tensor tractography)과 같은 장비를 이용하여 운동학습에 따른 뇌신경생리학적 변화와 손상으로 인한 운동기능의 회복 기전이 활발하게 연구되고 있다.^{11,12}

최근에는 운동학습이 이루어짐에 따라 대뇌피질에서 신경세포의 흥분성과 억제성의 전위 기종이 변화된다는 것을 뇌파 검사(electroencephalography, EEG)를 통해 입증되고 있다. 뇌파 검사의 특징은 기능적 자기공명영상에 비해 공간적 해상도(spatial resolution)는 떨어지나 시간적 해상도(temporal resolution)에서 탁월한 장점을 보이고 있으며, 측정 방법은 크게 자발전위(spontaneous potential)와 유발전위(evoked potential)로 구분할 수 있다.¹³ 운동학습과 관련된 뇌에서의 신경생리학적 변화는 대체로 유발전위를 사용하게 되며, 특히 수행자에게 운동 반응을 유발하게 하는 자극을 제시하고, 이때 발생하는 뇌파의 전위를 사건관련전위(event-related potential)라고 한다.^{13,14} 사건관련전위를 이용한 뇌파 검사는 운동학습의 효과와 이미 잘 학습된 신경학적 상태를 측정하는 도구로 유용하게 사용되고 있으며, 특히 시각적 자극을 제시하고 이때 발생하는 뇌파 전위가 정상적인 패턴과 다를 경우, 병적 상태로 진단할 수 있어 다발성 경화증과 같이 수초 파괴에 의한 질병임을 확인할 수 있다.

따라서 본 연구에서 뇌 신경 세포의 전위 신호에 대한 시간적 해상도가 좋은 뇌파를 이용하여, 시열반응과제의 훈련으로 인한 운동학습의 결과가 대뇌 피질의 활성화되는 양상에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보고자 하였다.

II. 연구방법

1. 연구대상

본 연구는 학력 수준이 비슷한 표집 선정을 위해 동일 대학의 특정 학과에 재학 중인 만 20세 이상 25세 미만 정상인 20명을 표집하였고, 다음의 선정 기준에 적합한 12명을 선정하였다.

대상자의 선별 기준은 1) Edinburg Handedness Inventory¹⁵의 우용 손 검사에서 평가 점수가 95점 이상으로 오른손이 강한 우성으로 판명된 자, 2) 최근 3년 이내에 상지의 근골격계 질환을 호소하지 않은 자, 3) 최근 1년 이내에 운동 반응 검사나 경두개 자기자극(transcranial magnetic stimulation) 또는 경두개 직류전류자극(transcranial direct current stimulation)과 같은 대뇌피질에 외부 자극을 가하는 실험에 참여하지 않은 자, 4) 과거 병력 상 신경 및 정신의학적 증상을 호소하지 않은 자, 5) 색맹검사에서 음성으로 판정된 자로 하였다.

모든 대상자는 실험에 참가하기 전 연구 목적과 방법에 대하여 충분한 설명을 듣고, 이에 자발적 동의를 한 후에 연구에 참여하였다.

2. 실험방법

대상자는 본 실험을 위해 특수 제작한 세 가지의 운동 반응 버턴들이 내장된 목형의 막대를 오른손으로 쥐고, 주관절이 90°가 되도록 높이 조절이 가능한 탁자 앞에 편안한 자세로 앉고, 바로 앞에 설치된 모니터를 응시한다. 막대와 연결된 목형의 틀은 주관절과 전완 원위부의 움직임을 제한할 수 있도록 하고, 대상자가 손목 관절을 중립 위로 하고, 두 번째에서 다섯 번째 손가락으로 막대를 잡고, 엄지손가락은 막대의 위 부분 버턴 위에 올려놓도록 하여 엄지손가락의 굴곡과 손목 관절의 굴곡과 신전이 일어날 수 있도록 하였다. 굴곡과 신전의 관절 허용 범위는 각 60°로 설정하고, 마지막 부위에 반응 센서를 설치되어 자극이 제시된 후의 반응 시간을 측정할 수 있도록 설계하였다. 동작의 종료 후에는 자발적 근 수축 없이 원위치로 되돌아 올 수 있도록 제작되고, 손목 관절을 굴곡 및 신전할 때, 실험자가 저항의 크기를 조절할 수 있도록 하였다. 따라서 목형의 막대에서 운동 반응은 엄지손가락의 굴곡, 손목 관절의 굴곡과 신전을 통해 수행하였다.

3. 측정도구

1) 시열반응과제

시열반응과제에서 반응 과제를 구성하기 위한 자극 제공 프로그램(SuperLab Pro version 2.04, Cedrus, USA)과 제시된 자

극에 운동 반응을 측정하는 반응 패드(RB-830, Cedrus, USA)에 연결된 목형 막대가 설치된 개인용 컴퓨터(A)(T41, IBM, USA)를 사용하여 대상자의 75cm 앞에 설치된 모니터를 통해 자극을 제시하고, 목형 막대에서 유발된 반응 동작에 대한 반응 시간을 측정하였다. 자극 프로그램과 반응 패드 및 목형 막대가 설치된 컴퓨터(A)는 I/O PCI card가 내장되어 있어, 자극 제공 프로그램이 제시하는 각각의 자극들의 유발 시점과 목형 막대에서 측정된 반응 시간에 대한 정보를 뇌파, 근전도, 전자측각기의 아날로그 신호를 수집하는 개인용 컴퓨터(B)(NX8420, HP, USA)에 전송하도록 설치하였다. 즉, 자극 제공 프로그램이 제공하는 자극은 대상자 앞의 모니터에서 제시되고, 대상자는 목형 막대의 세 가지 동작 중 그 자극에 상응하는 동작을 수행하여 운동 반응 시간을 측정하며, 자극의 제시 시점과 반응 시점의 정보는 다른 컴퓨터(B)로 전송되었다.

2) 뇌파 검사 및 뇌지도화 분석

뇌파 검사는 MP150 본체(Biopac System Inc, USA)와 이에 연결된 각각의 증폭기(amplifier module)를 사용하여, 생체 신호에 대한 아날로그 신호를 디지털화하고, 이와 연결된 개인용 컴퓨터(B)에 내장된 acqknowledge 소프트웨어를 사용하여 필터링과 기타처리를 한다. 또한 MP150 본체에 STP100C 증폭기가 연결되고, 이는 자극 제공 프로그램과 반응을 측정하는 컴퓨터(B)와 연결되어 자극과 반응의 유발 시점이 acqknowledge 소프트웨어를 통해 뇌파의 디지털 신호화 함께 표시되어, 시간적인 동기가 가능하도록 하였다.

뇌파는 EEG100C 증폭기와 International 10-20 system을 적용한 은은 염화 표면전극(silver-silver chloride surface electrode) Electrode cap(CAP100C, Biopac System, USA)을 사용하여 뇌신경 세로의 활성도를 측정하였다. 표준화된 세계 기준에 맞게 전극의 위치를 정확하게 부착할 수 있도록 고안된 10-20 system에 따라, 전극의 패드는 좌우측 뇌반구의 영역 F3, F4, C3, C4, P3, P4, Fz, Cz, Pz의 아홉 채널에 부착하고, 기준 전극(reference electrode)은 좌우측 경상돌기 위해 배치하며, 모든 전극의 전기 저항은 5k Ω 이내가 되도록 하였다. 또한 눈의 아래와 위, 양측 안와가장자리에 전극을 부착하여 안전위도(electro-oculogram)를 측정하여 뇌파에 영향을 주는 눈 깜박임과 눈동자의 움직임에 대한 전위를 Gratton 등의 방법으로 제거하였다. 신호의 수집은 1~70Hz의 band pass filter를 이용하며, 표본 추출률(sampling rate)는 500Hz로 설정하였다.

훈련 전과 후에 뇌파의 뇌지도화 분석은 BrianMap-3D 소프트웨어(Laxtha, Korea)를 이용하여 좌우측 뇌반구의 영역 F3, F4, C3, C4, P3, P4, Fz, Cz, Pz에 부착된 아홉 채널에서 수집된 알파 파형을 절대파워분석(absolute power analysis)을

실시하여, 파형의 강도를 색깔로 표시하고, 이를 삼차원 형태의 표준화된 두피 영상에 일치하도록 분석하였다.

3) 자극의 제시

자극의 제공은 컴퓨터 모니터 상의 검은색 바탕에 빨강, 노랑, 초록, 파랑, 흰색의 다섯 가지의 서로 다른 색깔의 원 모양이 동일한 위치에 연속적으로 나타나도록 구성하고, “시작”이란 신호가 모니터에 표시된 후, 대상자는 이에 상응하는 반응 버튼을 가능한 한 빨리 누르도록 하고, 정확하게 일치하는 색깔의 버튼을 눌렀을 때, 다음 색의 원이 연속적으로 제공되도록 하였다. 제시된 자극이 노랑과 초록일 경우, 손목 관절을 굴곡하고, 빨강과 파랑일 경우, 손목 관절을 신전하고, 흰색일 경우, 엄지손가락을 굴곡하도록 설정한다. 자극의 지속 시간과 자극 간의 간격 시간은 사전 사후 검사와 훈련 기간이 서로 다르게 설정되었다.

(1) 사전 사후 검사의 자세

사전 사후 검사는 제시되는 자극의 일정은 20개의 자극 중에 손목 관절을 신전해야 하는 빨강과 파랑이 제시되었을 때를 목표 자극으로 4회 설정하고, 흰색이 10회, 노랑과 초록이 6회 나타나게 하는 표준 자극으로 설정하여 무작위 순서로 20회 반복하도록 하였다. 따라서 목표 자극은 40회, 표준 자극은 160회로 구성되어 제시되는 자극의 수는 총 200회가 되었다. 제시되는 자극의 지속 시간은 2500ms로 설정하고, 각 자극의 앞에 200ms를 두었고, 시작 자세로 되돌아 가는 시점을 1500ms로 설정하였다. 대상자는 자극이 지속되는 2500ms 동안 목형 틀의 마지막 지점에서 지속적인 근 수축을 유발하도록 지시하고, 움직임의 저항 정도는 각 개인의 손목 관절 신전근의 최대수축력의 20%에서 맞도록 조정하였다.

(2) 훈련 기간의 자극

훈련 기간의 자극 시간은 800ms, 간격 시간은 20ms로 설정하여, 검사 기간에 비해 빠른 동작을 지속적으로 반복하도록 하며, 15분의 훈련 시간과 5분의 휴식 기간을 제공하여 하루 30분씩 2일 동안, 총 60분 동안 훈련하도록 하였다. 훈련 기간에서는 지속 시간이 짧기 때문에, 지속적인 근 수축을 할 필요가 없고, 목형 틀의 움직임에 대한 저항을 주지 않도록 하였다.

3. 자료분석

본 연구에서 수집된 자료는 SPSS for windows (version 15.0)을 이용하여 통계적 분석을 실시하였다. 대상자의 나이, 주용손 검사, 운동반응시간은 기술적 통계 방법을 사용하였고, 시열반응과제의 훈련 전과 후의 운동반응시간의 차이는 짝비교 검

Table 1. General characteristics of subjects

Subject(n=12)	
Sex (Male / female)	6 / 6
Age (Mean±SD)	21.66±2.71
Edinbergh Handedness Inventory Test (Mean±SD)	93.75±5.23

Table 2. The comparison of motor reaction time between the pre-test and the post-test

	pre-test (Mean±SD)	post-test (Mean±SD)	t	p
Onset of response time(ms)	845.26±118.33	642.56±94.14	9.006	0.00*

*p<0.05

정(paired ttest)를 실시하였다. 통계적 유의수준은 0.05로 설정하였다.

III. 결과

1. 연구대상자의 일반적인 특성

본 연구에 참여한 대상자의 일반적인 특징은 Table 1과 같다. 총 12명이 중 남자가 6명, 여자가 6명이고, 평균 연령은 21.66세이였으며, 우측 손이 우성이었다.

2. 훈련 전과 후의 운동 반응 시간의 변화

훈련 전과 후, 자극이 제시된 시점에서 SuperLap에서의 운동 반응 시점 사이의 시간 간격을 비교해 보면, 훈련 전 845.26 ms, 훈련 후 642.56ms로 202.70ms만큼 시간 간격이 감소하였으며, 통계학적으로 유의한 차이가 있었다(p<0.05)(Table 2).

3. 훈련 전과 후의 뇌활성도 변화

훈련 전과 후의 사전 및 사후 검사 기간 동안, 수집된 뇌파를 BrianMap-3D 소프트웨어(Laxtha, Korea)를 이용하여 좌우측 뇌반구의 영역F3, F4, C3, C4, P3, P4, Fz, Cz, Pz 에 부착된 아홉 채널에서 수집된 알파 파형을 절대파워분석(absolute power analysis)을 실시한 결과는 다음과 같다(Figure 1).

훈련 전에는 다른 영역에 비해 전두엽에서의 활성도가 높은 반면, 훈련 후에는 전두엽과 일차운동감각역에서 높은 활성도를 보였다. 또한 훈련 후는 전과 비교하여 서로 다른 양상의 활성도를 보였다.

IV. 고찰

운동학습은 연습과 경험에 의해 비교적으로 영구적으로 지속되는 행동학적 변화를 말하는 것으로, 오래 전부터 운동생리학, 심리학, 체육학 등을 포함하여 뇌신경과학 분야에서 많은 관심과 연구가 진행되어 왔다. 움직임의 학습 능력에 영향을 미칠 수 있는 다양한 변수들에 대한 연구와 운동학습의 과정에 따른 신경학적 차원의 뇌신경 구조의 영역별 기능에 대한 연구도 활발하게 이루어져 왔다.^{3,11} 본 연구에서는 시열반응과제를 사용

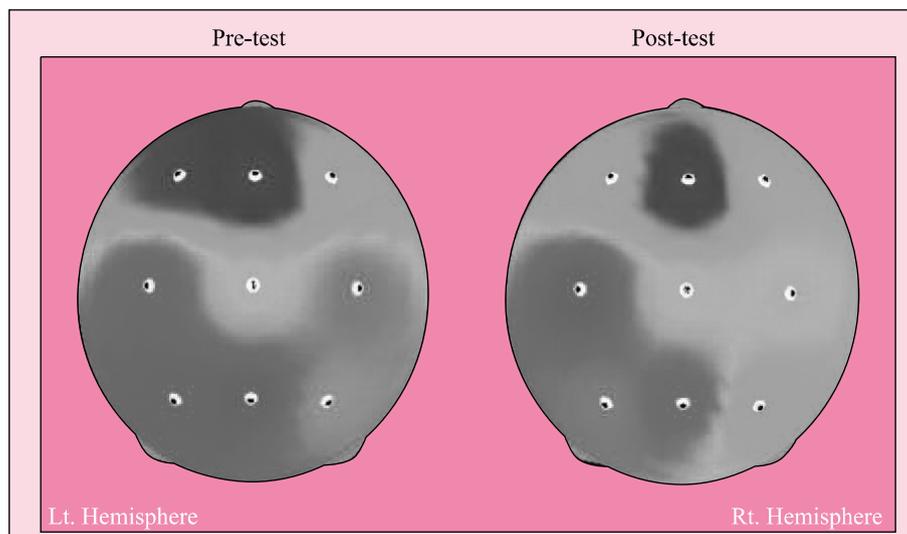


Figure 1. The comparison of the cortical activation map between the pre-test and the post-test.

하여 시각적 자극이 제시되고 난 후의 운동 반응 시간을 측정하여 운동학습 능력에 따른 반응 시간의 변화와 뇌파 검사를 통해 대뇌피질에서의 활성화되는 양상의 변화를 관찰하였다. 뇌파 검사는 뇌에서 일어나는 흥분성과 억제성 시냅스의 전기적 가중을 반영하는 비침습적인 측정 방법으로,^{16,17} 공간적 해상도는 다소 낮은 반면, 시간적 해상도가 높아 뇌신경 활동의 시간적 활성화도와 효율성을 측정하기에 많은 장점을 가지고 있기 때문에, 운동학습으로 인한 시각적 자극이 제시된 후의 뇌신경 활동 시간의 변화를 측정하기 위해 사용되었다.

그 결과, 시열반응과제를 수행하는 동안 운동 반응 시간이 단축되었고, EEG 지도화 분석결과에서 시열 운동학습 전과 후에 뇌 활성화의 정도와 위치에서 차이를 보였다. 운동학습 전 검사에서는 좌측 뇌반구에서 활성화 정도가 더 크지만 전반적으로 양측 뇌반구 모두에서 활성화가 일어났다. 활성화 부위로는 양측 전두엽(frontal lobe), 운동 감각 영역(sensorimotor area), 좌측 두정엽(parietal lobe)으로 확산적으로 분포를 보였다. 하지만, 운동 학습 후 검사에서는 좌측 뇌반구에 편측성으로 전두엽, 운동감각영역, 두정엽에서 활성화가 일어나 운동 학습으로 인한 변화를 알 수 있었다. 따라서, 시열 학습 전과 후의 EEG 지도화에서 뇌 활성화의 점차적인 감소를 확인할 수 있었다.

본 연구의 EEG와 운동 학습에 관련된 선행연구로 Praeg 등¹⁸은 시각 운동 과제의 연습 동안 학습 과정과 시간 간격에 있어 신경원의 활성화(neuronal activation)의 변화에 대해 설명하였다. 그들은 본 연구의 방법과 유사한 네 가지 버튼과 네 가지 시각적 자극에 대해 반응하는 과제를 수행하였고, 초기 학습 동안과 자극 후 100~400ms에서 두정엽-전전두엽 그물망(parieto-prefrontal network)에서 강한 신경원의 활성화를 보였고, 운동 반응과 관련된 신경원의 활성화는 초기 학습과정보다 중간 정도의 학습단계에서 더욱 증가하였다고 하였다. 또한 특정 시간에 따라 운동 반응 전인 자극 후 120~360ms에서 신경원의 활성화는 대상운동영역(cingulate motor area)과 우측 배측 전운동피질(dorsal premotor cortex)에서 감지되었으나, 운동 반응 후인 자극 후 68~430ms에서는 두정엽, 보조운동영역(Supplementary motor area), 전운동영역(premotor area), 후외측 전전두엽(dorsolateral prefrontal cortex)와 해마옆 피질(parahippocampal cortex)을 포함한 시각-운동과 기억에 관련된 영역에서 신경원 활성화가 증가된 변화를 보였다고 하였다.

운동학습에 따른 뇌 활성화의 변화에 관한 다른 뇌지도화 연구를 살펴보면, Sakai 등¹⁹은 시열 운동 학습 단계를 기능적 자기공명영상으로 뇌 활성화를 연구하였는데, 신호 강도의 상대적인 증가와 활성화된 화소(pixels) 정도에서 의미적인 변화를 볼 수 있었다. 그 결과로 학습의 초기에는 전두영역, 후외측

전전두엽, 전보조운동영역이 활성화된 반면, 학습의 후기에는 두정엽 부위, 내측의 췌기전소엽(precuneus), 두정간구(intraparietal sulcus)에서 활성화되었다. 이것으로 시각운동 시열과제의 습득 단계에서는 전두 부위의 활성화가 필요한 반면에 그 과제의 회상(retrieval)은 두정 부위의 활성화가 필요한데, 이것은 선언적(declarative)학습 단계에서 절차적(procedural) 학습 단계로의 전환을 반영하는 것이라 볼 수 있다. 또한 Floyer-Lea와 Matthews²⁰의 연구에서도 좀 더 집중이 많이 요구되는 학습 초기에는 전전두엽, 양측 감각운동영역 그리고 두정엽을 포함한 넓은 부위에 상대적으로 많은 활성화가 있었고, 또한 미상핵(caudate nucleus)과 동측 소뇌 반구에서 활성화가 보였다. 하지만 학습으로 수행이 향상되어짐에 따라 그 부위의 활성화는 점차적으로 감소함을 보여주었다. 그러므로 이 연구결과와의 의미는 운동 기술의 학습은 피질부위에서 넓게 분포된 활성화의 점차적인 감소와 연관이 있음을 알 수 있다.

운동 기술의 학습에 따른 대뇌피질 영역에서 활성화되는 양상을 관찰한 선행 연구들은 운동과 관련된 여러 대뇌피질 영역에서 활성화 양상의 변화를 보이며, 학습의 단계 및 속성에 따라 각 부위별 기능이 서로 다르게 기여한다고 하였다. 전전두엽 부위의 활성화는 일반적으로 외현적 운동 학습의 초기 단계 동안 기록된다. 이 영역은 운동학습에서 움직임의 결정과 선택에서 그리고 집중 과정과 관련이 있다.²¹ 특히 후외측 전두엽은 시행착오(by trial and error)에 의한 학습에 특정한 역할을 담당하는데, 우측 후외측 전두엽은 시각-운동학습에서의 초기 습득 시에 중요한 역할을 한다.²² 또한 대상 피질 역시 전전두엽의 활성화와 함께 관찰되어지는데, 운동학습에서 감각 피드백 과정이 암호화될 때 전 대상 피질(anterior cingulate cortex)에서 활성화가 보여진다.²³ 그리고 전 보조운동 영역은 외현적 운동학습의 초기 운동에서만 관련되고, 후기 단계에서는 활성화되지 않는 것으로 설명된다.²⁴ 보조운동영역에서의 활성화는 연습 동안 증가하고, 외현적 학습을 하는 동안 전 보조운동영역이 관련되는 것과 대조적으로 보조운동영역은 내잠적 학습과 관련된 연습 동안 활성화가 보여지며, 특히 순차적 과제에서 관찰된다.²⁵ 외측 전운동영역에서의 활성화는 초기 단계의 학습 단계에서 양측성으로 보여진다.^{21,26} 또한 Jenkins 등²⁷의 연구에서 청각 피드백에 의해 순차적인 버튼을 누르는 과제를 통해 초기 학습 단계 동안 전운동영역에서의 활성화가 후기의 학습 단계와 비교하여 더 강한 활성화를 관찰되어짐을 기록하였다. 하전두엽은 일반적으로 브로카 영역으로 알려져 있는데, 마찬가지로 숙련된 운동을 습득하는데 관련이 있음이 보여진다. 숫자에 의한 단서를 주는 자극과 관련된 시열 학습 동안 우측 하전두엽 영역에서 학습과 관련된 활성화가 보였음을 기록하였다.²⁸ 두정엽은 운동 학습의 시기에 따라 차이가 있는데, 초기

운동 학습에서 우측 뇌반구에서 활성화가 증가되는 반면에 운동 학습의 후기단계에서는 좌측 뇌반구의 후두정엽에서 높은 활성화가 발견되어진다.²¹

본 연구에서는 시열반응과제를 통한 운동학습의 변화를 뇌파를 이용한 뇌 지도화 기법을 이용하여 변화되는 대뇌피질의 활성화 양상을 관찰하였다. 뇌파 측정은 시간적 해상도가 높아 뇌신경 활동의 시간적 활성화도와 효율성을 측정하기에 많은 장점을 가지고 있으며, 안전한 비침습적 방법으로 운동학습으로 인한 시각적 자극이 제시된 후의 뇌신경 활동 시간의 변화를 측정하기에 적합하다고 볼 수 있다. 따라서 향후 운동학습뿐 아니라, 뇌 손상 환자에서의 신경병리적인 특성을 알고 치료적 중재 후에 나타나는 뇌신경의 재조직화되는 양상을 연구할 수 있는 좋은 도구로 활용 가치가 있다고 생각된다.

V. 결론

본 연구는 정상 성인을 대상으로, 운동학습의 패러다임으로 가장 보편적으로 사용되는 시열 반응 과제를 이용하여 운동학습으로 인한 학습 전과 후의 뇌파의 변화를 알아보고자 하였다. 그 결과, EEG 지도화 분석결과에서는 훈련 전에는 양측 뇌의 전두엽과 측두엽에서 전반적인 활성화를 보였으나, 훈련 후에는 대측 뇌반구의 전두엽과 측두엽에서 국소적인 활성화를 보였다. 시열반응과제의 반복적 훈련은 자극이 제시되고 난 후의 운동 반응 처리 과정을 향상시켰다. 이러한 일련의 변화가 뇌의 활성도를 반대측 운동감각영역으로 국소화하는 뇌신경의 재조직화를 유발하였다.

Author Contributions

Research design: Chang JS, Kwon YH
 Acquisition of data: Kwon YH, Kim CS
 Analysis and interpretation of data: Kwon YH, Chang JS
 Drafting of the manuscript: Kwon YH, Kim CS
 Administrative, technical, and material support: Kwon YH
 Research supervision: Kim CS

Acknowledgements

이 논문은 2007학년도 대구대학교 학술연구비지원에 의한 논문임

참고문헌

- Schmidt RA, Lee TD. Motor control and learning: A behavioral emphasis. Champaign, Human Kinetics, 1999.
- Leonard CT. The neuroscience of human movement. St. Louis, Mosby, 1998.
- Kwon YH, Chang JS, Hong JH et al. Motor skill learning through mental imagery training with serial reaction time task. Journal of Korean Society Occupational Therapy. 2007;15(1):57-65.
- Lee MY, Park RJ, Nam KS. The effect of implicit motor sequence learning through perceptual-motor task in patients with subacute stroke. J Kor Soc Phys Ther. 2008;20(3):1-7.
- Kwon YH, Kim CS, Jang SH. The ipsilesional motor deficits in hemiparetic patients with stroke. NeuroRehabilitation. 2007;22(4):279-86.
- Berger A, Sadeh M, Tzur G et al. Motor and non-motor sequence learning in children and adolescents with cerebellar damage. J Int Neuropsychol Soc. 2005;11(4):482-7.
- Kelly SW, Jahanshahi M, Dirnberger G. Learning of ambiguous versus hybrid sequences by patients with parkinson's disease. Neuropsychologia. 2004;42(10):1350-7.
- Kim CS, Kwon YH, Kim K. Ipsilateral Motor Deficit during Three Different Specific Task Following Unilateral Brain Damage. J Kor Soc Phys Ther. 2005;17(2):67-87.
- Bear MF, Connors B, Paradiso M. Neuroscience: Exploring the brain. Baltimore, Lippincott Williams & Wilkins, 2006.
- Landau SM, D'Esposito M. Sequence learning in pianists and nonpianists: An fmri study of motor expertise. Cogn Affect Behav Neurosci. 2006;6(3):246-59.
- Kim JS, Kwon YH. Symptoms and prognosis of the pusher syndrome in unilateral brain damage. Journal of Special Education & Rehabilitation Science. 2005;44(3):75-90.
- Jang SH, Kwon YH. Motor recovery in stroke patients. Yeungnam University Medical Journal. 2005;22(2):119-30.
- Schwilden H. Concepts of eeg processing: From power spectrum to bispectrum, fractals, entropies and all that. Best Pract Res Clin Anaesthesiol. 2006;20(1):31-48.
- Kim JG. Event related potentials in response to overtraining and its influences on information processing. Korean Journal Sport Psychology. 2005;16(1):31-46.
- Oldfield RC. The assessment and analysis of handedness: The edinburgh inventory. Neuropsychologia. 1971;9(1):97-113.
- Freeman WJ, Holmes MD, Burke BC et al. Spatial spectra

- of scalp eeg and emg from awake humans. *Clin Neurophysiol.* 2003;114(6):1053-68.
17. Leuthardt EC, Schalk G, Wolpaw JR et al. A brain-computer interface using electrocorticographic signals in humans. *J Neural Eng.* 2004;1(2):63-71.
 18. Praeg E, Esslen M, Lutz K et al. Neuronal modifications during visuomotor association learning assessed by electric brain tomography. *Brain Topogr.* 2006;19(1-2):61-75.
 19. Sakai K, Hikosaka O, Miyachi S et al. Transition of brain activation from frontal to parietal areas in visuomotor sequence learning. *J Neurosci.* 1998;18(5):1827-40.
 20. Floyer-Lea A, Matthews PM. Changing brain networks for visuomotor control with increased movement automaticity. *J Neurophysiol.* 2004;92(4):2405-12.
 21. Deiber MP, Wise SP, Honda M et al. Frontal and parietal networks for conditional motor learning: A positron emission tomography study. *J Neurophysiol.* 1997;78(2):977-91.
 22. Halsband U, Lange RK. Motor learning in man: A review of functional and clinical studies. *J Physiol Paris.* 2006;99(4-6):414-24.
 23. Kawashima R, Tajima N, Yoshida H et al. The effect of verbal feedback on motor learning—a pet study. *Positron emission tomography.* *Neuroimage.* 2000;12(6):698-706.
 24. Hikosaka O, Rand MK, Miyachi S et al. Learning of sequential movements in the monkey: Process of learning and retention of memory. *J Neurophysiol.* 1995;74(4):1652-61.
 25. Grafton ST, Salidis J, Willingham DB. Motor learning of compatible and incompatible visuomotor maps. *J Cogn Neurosci.* 2001;13(2):217-31.
 26. Inoue K, Kawashima R, Satoh K et al. Activity in the parietal area during visuomotor learning with optical rotation. *Neuroreport.* 1997;8(18):3979-83.
 27. Jenkins IH, Brooks DJ, Nixon PD et al. Motor sequence learning: A study with positron emission tomography. *J Neurosci.* 1994;14(6):3775-90.
 28. Honda K, Sawada H, Kihara T et al. Phosphatidylinositol 3-kinase mediates neuroprotection by estrogen in cultured cortical neurons. *J Neurosci Res.* 2000;60(3):321-7.