



■ 권용현, 김종선¹, 장성호²

■ 영남이공대학 물리치료학과, ¹대구대학교 재활과학대학 물리치료학과, ²영남대학교 의과대학 재활의학교실

Cortical Activation in the Human Brain induced by Transcranial Direct Current Stimulation

Yong-Hyun Kwon, PT, PhD; Chung-Sun Kim, PT, PhD¹; Sung-Ho Jang, MD²

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

Purpose: Recently, neurostimulation studies involving manipulation of cortical excitability of the human brain have been increasingly attempted. We investigated whether transcranial direct current stimulation (tDCS) applied to the underlying cerebral cortex, directly induces cortical activation during fMRI scanning.

Methods: We recently recruited five healthy subjects without a neurological or psychiatric history and who were right-handed, as verified by the modified Edinburgh Handedness Inventory. fMRI was done while constant anodal tDCS was delivered to the underlying SM1 area?? immediately after the pre-stimulation for eighteen minutes.

Results: Group analysis yielded an averaged map that showed that the SM1 area and the superior parietal cortex in the ipsilateral hemisphere were activated. The voxel size and peak intensity were, respectively, 82 and 5.22 in the SM1, and 85 and 5.77 in the superior parietal cortex.

Conclusion: Cortical activation can be induced by constant anodal tDCS of the underlying motor cortex. This suggests that tDCS may be an effective therapeutic device for enhancing? physical motor function by modulating neural excitability of the motor cortex.

Keywords: Transcranial direct current stimulation, Cortical activation, Functional MRI

논문접수일: 2009년 10월 7일

수정접수일: 2009년 11월 11일

게재승인일: 2009년 12월 15일

교신저자: 장성호, strokerehab@hanmail.net

1. 서론

과학기술의 발전과 함께 신경과학 분야에도 첨단 공학적 기술을 응용하여 뇌의 기능을 조절(modulation)하기 위한 많은 새로운 기기가 개발되고 있다. 특히 그러한 원리를 활용하여 신경계 질환으로 인한 손상된 뇌 기능의 회복을 촉진하기 위한 치료 도구로서의 활용을 모색하기 위한 다양한 연구가 시도되고 있다. 최근 도입된 기기들로는 가상현실(virtual reality)을 이용한 치료 기구, 치료용 로봇(robotic assistive device), 반복적 경두개 자기 자극(repetitive transcranial magnetic stimulation), 경

두개 직류전류 자극(transcranial direct current stimulation), 기능적 전기자극(functional electrical stimulation) 등이 있다.¹⁻⁵

그 중에서 반복적 경두개 자기 자극과 경두개 직류전류 자극은 뇌를 직접적으로 자극하여 뇌 세포의 흥분성을 변화시킬 수 있는 가장 대표적인 비침습적 장비로서, 살아있는 인간의 뇌의 흥분성을 촉진 또는 억제하여 뇌의 영역별 신경생리학적 기능을 밝혀내거나 뇌질환으로 인한 기능 손상 회복을 위해 많은 영역에서 관심을 가지고 있다.^{3,6-8} 특히 경두개 직류전류 자극은 고대에서 전해져 오던 전기를 활용한 치료적 접근을 현대의

과학적 방법으로 200년 전에 처음으로 도입되었지만 두각을 보이지 못하다가, 최근 1990년대 후반에 Nitsche와 Paulus,⁶ Priori 등⁷의 연구에 의해 재부각되기 시작하였다. 이는 두 개의 전극을 두피(scalp)에 부착하고 1~2mA 정도의 미세한 전류를 통전시키는 것으로, 양전극(anodal electrode)에서는 뇌신경 세포의 흥분성을 증가시키고 음전극(cathodal electrode)에서 흥분성을 감소시킨다고 알려져 있다.⁶⁻⁸

경두개 직류전기 자극의 극성에 따른 기능적 효과는 많은 연구들에 의해 입증되고 있는데, 일차운동감각영역 및 전운동 영역에 양전극의 적용은 손의 운동 기능을 증진시키고 암묵적 운동학습(implicit motor learning)과 작업 기억 능력(working memory)을 촉진할 수 있으며, 후두엽의 적용은 시지각 운동 능력(visuo-motor learning)을 향상시킨다고 한다.^{9,10} 또한 Furubayashi 등¹¹은 운동피질영역에 10분 동안의 경두개 직류 전기의 적용은 피질척수의 신경세포의 흥분성을 촉진하여 운동 유발전위(motor evoked potential)의 진폭(amplitude)을 증가시켰고 단축된 잠재기(latency)를 보였다고 하였다. 이러한 정상인에 대한 신경생리학적 연구와 더불어, 우울증이나 정신분열증이 있는 정신의학적인 문제가 있는 환자에게 적용하여 그 증상이 호전되었다는 연구가 제시되었고,⁸ 특히 뇌졸중 환자에게 적용하여 유창성 실어증(fluent aphasia)이 개선되었거나 상지 또는 하지의 운동 기능이 향상되었다고 연구가 보고되고 있다.¹²⁻¹⁴

경두개 직류전기 자극의 효과를 입증하기 위한 연구들은 뇌의 기능적 변화를 나타내는 신체적 능력을 측정한 사전-사후 실험으로 설계하여, 직류전기 자극의 사후효과(after-effect)를 입증하였다. 이러한 사후효과는 전류의 강도와 적용기간에 따라 다양하지만, 일반적으로 적어도 30분에서 한 시간까지 지속된다고 보고되고 있다.^{6,11,15} 이와 같이, 경두개 직류전기 자극은 뇌에 비침습적인 방법으로 직접적으로 간편한 방법으로 자극을 제공할 수 있는 장점이 있으며, 다른 뇌 자극 기기에 비해 비용이 저렴하다. 특히 휴대가 간편하고 비전문가가 개인적으로 쉽게 적용할 수 있게 개발된다면 경제적 효율성이 높아 학문 및 산업적인 활용 가치가 높다고 볼 수 있다. 또한 경두개 직류전기의 활용에 대한 안정성은 이미 잘 정립되어 있다.¹⁶ 그러나 경두개 직류전기 자극을 적용한 후, 다양한 뇌 기능을 조율하여 인지 및 운동 기능과 같은 행동학적 변화를 유도할 수 있다는 많은 연구들이 존재하고 있지만, 실제 뇌 신경 세포의 활성화에 직접적인 효과를 입증한 논문은 많지 않다.^{4,17,18}

최근 외부적인 자극에 따른 뇌 신경 세포들의 흥분성과 활성도의 변화를 측정하는 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 가장 대표적으로 양전자 단층 촬영(Positron emission tomography), 기능적 자기공명영상(functional magnetic resonance image)이

많이 사용되고 있다.^{19,20} 특히 기능적 자기공명영상은 공간적 해상도가 뛰어나 대뇌피질 수준에서 작은 뇌 혈류량의 미세한 변화를 감지하여 뇌의 기능적 영역을 정확하게 구별할 수 있는 뇌지도화 장비이다.¹⁹

따라서 본 연구는 미세한 뇌 혈류 변화를 감지할 수 있는 기능적 자기공명영상을 활용하여, 경두개 직류전기 자극이 뇌 세포의 활성화에 직접적인 효과를 제공할 수 있는지를 연구하고자 하였다.

II. 연구방법

1. 연구대상

연구에 참여한 대상자는 Edinburg Handedness Inventory²¹에서 오른손잡이로 입증된 5명의 20대 정상 성인이 참여하였다. 대상자의 선별 기준은 신경학 및 정신심리학적 문제가 없으며, 최근 3개월 이내에 경두개에 자기 또는 전기 자극을 가하는 실험에 참여하지 않은 자를 대상으로 하였다. 모든 대상자들은 실험에 앞서 본 연구의 목적과 실험 절차를 충분히 숙지하고 난 후, 실험 참여에 서면 동의하였다.

2. 실험방법

1) 경두개 직류전류 자극의 적용

본 실험에 사용된 경두개 직류전류 자극기는 독일의 Ilmenau사에서 제작된 NeuroConn에 자기공명영상 촬영실에서 자기장의 영향을 받지 않도록 고안된 전선(Lead108, Biopac system Inc, US)과 한 쌍의 전극(EL508, Biopac system Inc, US)을 연결하여 사용하였다. 각 전극은 5×7cm 크기의 물 흡수력이 높은 스폰지 위에 자기장의 영향을 받지 않도록 특수 제작된 전극을 올려놓고 인체에 적용하여, 생체 조직을 손상하지 않는다고 입증된 0.029mA/cm²의 전류가 통전되었다. 전극의 배치는 양전극(anodal electrode)의 중앙이 좌측 뇌반구에서 손의 운동 기능에 관여하는 일차운동감각영역의 중심에 위치하도록 하였고, 음전극(cathodal electrode)은 우측 뇌반구의 안와상 영역(supraorbital area)에 부착하였다. 양전극의 정확한 위치 설정을 위하여, 경두개 자기 자극기를 사용하여 근전도상에서 소지 외전근(abductor digiti minimi muscle)의 흥분 역치가 낮고 잠복기가 가장 짧으며, 평균 진폭이 가장 높게 유발되는 운동 유발 지점(motor hot spot)을 찾아 적용하였다.

2) 기능적 자기공명영상 촬영

대상자는 기능적 자기공명영상 장치실 밖에서 직류전류의 통전을 위한 전극을 경두개에 배치하고, 기능적 자기공명영상 장치

안에서 편안히 누운 자세에서 머리와 몸통을 움직일 수 없도록 고정되었다. 직류자극은 기능적 자기공명영상 장치실 밖의 자극기에 연결된 자기장의 영향을 받지 않은 전선을 통해 대상자의 경두개에 배치된 전극에 통전되었다. 직류전류는 1.0mA의 전류 강도로, 기능적 자기공명영상 촬영 전에 총 18분과 촬영이 진행되는 동안 63초 적용되었다(Figure 1). 직류전류가 인체에 적용되는 동안, 모든 대상자는 전극 부위에 약간의 간지럼을 느끼거나, 아무런 감각을 느끼지 못하였다. 18분 동안의 직류전류의 적용 후, 21초의 주기가 총 3회 반복되는 통전기와 21초의 주기가 총 3회 반복되는 휴식기의 기능적 자기공명영상 촬영이 진행되었다.

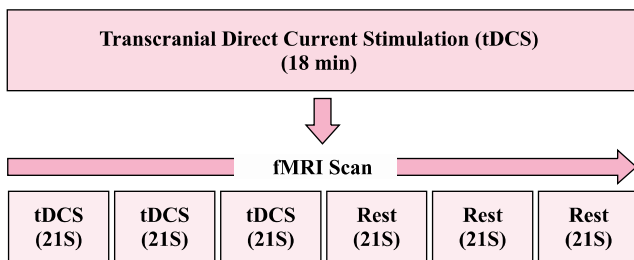


Figure 1. The fMRI experimental paradigm during transcranial direct current stimulation

기능적 자기공명영상의 촬영은 1.5T MR scanner (Gyrosan Intera System, Philips, 독일)에서 두부코일을 사용하여 single shot Echo Planar Imaging (EPI)으로 Blood Oxygen Level Dependent (BOLD) 기법을 적용하였다. 직류전류의 통전기와 휴식기 동안 한 개의 뇌 볼륨 당 20장의 뇌 절편이 획득되었고, 총 65 볼륨의 영상을 촬영하였다. 기능적 자기공명영상의 촬영 변수는 TR (time of repeat)이 2100ms, TE (time of echo)는 50ms, Flip angle은 70° , Field of View (FOV)는 210mm이었다. 매트릭스 크기는 64×64 , 뇌 절편 당 두께는 5mm이었다. 기능적 자기공명영상촬영 후에는 T1 영상을 전교련과 후교련(anterior commissure-posterior commissure) 연결선에 평행하게 수평면(transverse plane)으로 20장의 뇌 절편을 얻었다. T1에 대한 자기공명영상의 촬영 변수는 TR이 940ms, TE가 15ms이었으며, 나머지 조건은 기능적 자기공명영상 촬영의 변수와 같았다. 얻어진 기능적 자기공명 영상 중에서 volume 내의 수소원자핵의 수직자화가 안정적인 부분포화에 도달하기 전에 얻어지는 영상의 영향을 제거하기 위하여 처음 5 볼륨은 분석에서 제외하였다.

3) 기능적 자기공명영상의 분석 방법

촬영된 영상은 MATLAB (Mathworks, Inc., 미국) 환경에서 구현되는 SPM2 소프트웨어(Statistical Parametric Mapping 2

version, Wellcome Department of Cognitive Neurology, London, 영국)로 분석하였다. SPM2 프로그램을 이용하여 머리의 움직임을 보정하기 위한 재배열(realignment)을 하였으며 각 피험자의 T1 MRI 영상에 재배열 절차에서 생성된 mean-image와 EPI 영상을 상관정렬(coregister) 하였다. 또한, 정상인에서는 각 개인이 뇌 형태적 차이를 교정하기 위하여 표준화된 뇌공간에 template image (Montreal Neurologic Institute)를 사용하여 정상화하였고, smoothing은 8mm isotropic Gaussian Kernel을 사용하였다.

이렇게 처리된 결과를 바탕으로 BOLD 신호의 변화를 얻기 위하여 실험조건과 비교조건을 감산(subtraction)하였다. 모델의 구성 시 저주파 잡음은 high-pass filter를 이용하여 제거하였으며, 조건들의 반복제시에 의한 hrf의 효과는 SPM2가 제시하는 주파수의 low-pass filter로 제거하였다. 이렇게 구성된 모델과 영상 처리된 결과는 ANCOVA를 이용하여 분석하였으며, 뇌 전체 영역에서 나타나는 활성의 변화는 조건들간의 부피소(voxel) 대 부피소를 짝비교-t 검정으로 분석하였다. 본 연구의 집단 결과 분석은 고정효과모델(fixed effect model)을 이용하여 통계 역치를 부피소 수준에서 정하였으며 높이 역치(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 p값은 부피소의 높이 역치(height threshold)와 범위 역치(extent threshold)의 상호작용에 의하여 SPM2 소프트웨어에 의하여 계산되었다. 정상인에서 활성화된 뇌 영역은 공간적 정상화(spatial normalization) 후 개별적 활성화 지도를 집단으로 합산(grouping)하였다. 관심영역(region of interest)을 일차 감각운동피질(primary sensory-motor cortex, SM1), 전운동영역(premotor area), 보조운동영역(supplementary motor area, SMA), 두정엽 (parietal lobe)으로 설정하여 분석하였다. 또한 관심영역 내에서 뇌 혈류량과 피질 활성도의 변화를 반영하는 척도인 부피소 및 최대 강도(peak intensity)와 Talairach 좌표값이 측정되었다.

III. 결과

참여한 5명의 대상자에서 남자가 4명이었고, 평균 나이는 27.2세(표준오차; 0.92)이었다. 경두개 직류전류가 통전되는 동안 뇌활성도의 변화를 측정한 기능적 자기공명영상의 집단 분석 결과, 좌측 뇌반구의 일차운동감각영역 및 상부 두정엽에서 뇌

활성도가 나타났다(Figure 2). 일차운동감각영역에서의 활성화된 부피소와 최대 강도는 각각 82, 5.22로 나타났고, 상부 두정엽에서는 각각 85, 5.77로 나타났다. 또한 일차운동영역에서 활성화된 Talairach의 x, y, z 좌표값은 -38, -22, 56이었고, z 값은 2.73이었다. 상부 두정엽에서 활성화된 Talairach의 x, y, z 좌표값은 -16, -58, 68이었고, z값은 2.84이었다(Table 1).

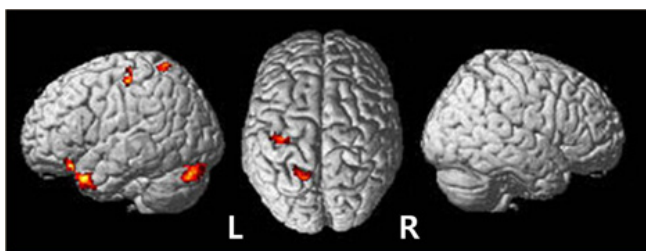


Figure 2. The average map of cortical activation induced by transcranial direct current stimulation

Table 1. Regions of significant BOLD signal during transcranial direct current stimulation

Region	voxel	Peak intensity	Tarairachi coordinates			
			x	y	z	z-value
Primary motor cortex	82	5.22	-38	-22	56	2.73
Posterior parietal cortex	85	2.77	-16	-58	68	2.84

IV. 고찰

최근 생체의 두피 외부에서 미세한 전류를 통전하는 경두개 직류전기 자극이 뇌 세포들의 흥분에 변화를 유발하여 다양한 뇌의 기능을 조절할 수 있다는 많은 연구가 보고되고 있다. 본 연구는 경두개 직류전기 자극을 하는 동안, 직접적으로 뇌 세포의 활성화를 촉진할 수 있는지를 기능적 자기공명영상을 활용하여 입증하였다. 그 결과, 직류전기 자극이 통전되었던 전극 바로 아래에 있는 뇌 영역인 일차운동감각영역과 상부 두정엽에서 활성화도가 나타났다. 이러한 연구 결과는 경두개 직류전기 자극이 신체적인 활동 능력과 뇌 활성도의 변화를 유도할 수 있다는 많은 선행 연구들과 일치하는 결과를 보였다. 따라서 지속적인 경두개 직류전기 자극은 자극이 제공되는 부위의 뇌 세포들을 활성화하기에 충분한 역할을 할 수 있다고 여겨진다.

경두개 직류전기 자극이 뇌 기능을 촉진할 수 있다는 선행 연구들을 살펴보면, 대체적으로 뇌 세포의 흥분성의 역치 변화를 측정하는 경두개 자기 자극을 활용한 연구와 뇌 혈류량의

변화와 활성도를 나타내는 뇌 지도화 연구로 구분된다. 먼저 뇌 세포의 흥분성의 변화를 입증한 연구들에 의하면, Lang 등²²은 1mA의 직류전기를 10분 동안 통전한 후 경두개 자기 자극을 통해 운동유발전위(motor evoked potential)를 측정된 결과에서 통전하기 전에 비해 32%가 증가되었다고 보고하였다. 또한 Boros 등²³은 경두개 직류전기를 전운동영역에 적용한 후에 일차운동감각영역에서의 운동유발전위를 측정된 결과, 진폭이 적용 전에 비해 유의하게 증가하였다는 결과를 보고하여, 직류전기를 통해 뇌반구 내에서의 주위 피질 영역의 흥분성을 촉진할 수 있다는 것을 보여 주었다. 양전자 단층 촬영이나 기능적 자기공명영상을 통해 경두개 직류전기 자극이 뇌 활성도의 변화를 유도할 수 있다는 연구들에 의하면, Baudewig 등¹⁷은 5분간 1mA의 직류전기를 적용하기 전후에 손가락의 연속적인 대립 과제(sequential finger opposition task)를 수행하는 동안 기능적 자기공명영상을 촬영한 결과, 통계적인 유의하지 않더라도 5%의 뇌 활성도가 증가하였다고 보고 하였다. 또한 Lang 등¹⁸은 10분간 1mA의 직류전기를 통전하기 전후에 손가락의 무작위 반복 운동(random sequential finger movement)을 하는 동안 양전자 단층 촬영을 한 결과, 전두엽, 일차운동감각영역, 후두엽 등의 광범위한 영역에서 활성화도가 증가하였다고 보고하였다. 위에서 언급한 연구들은 경두개 직류전기 자극이 뇌 활성도의 변화에 영향을 미칠 수 있다는 결과를 보여주고 있지만, 직류전기의 적용하기 전과 후의 변화를 비교한 연구로 본 연구와 다소 차이점이 있다.

직류전기를 통전하는 동안의 직접적인 영향을 평가한 본 연구는 2008년에 출판된 Kwon 등⁴의 연구와 같은 결과를 보인다. Kwon 등⁴은 총 84초간의 직류전기를 적용하는 동안 기능적 자기공명영상을 촬영하여 뇌 활성도의 변화를 관찰한 결과, 동측의 일차운동감각영역과 보조운동영역, 반대측 후 두정엽에서 활성화도가 나타났다고 보고하였다. 두 연구 결과에서 경두개 직류전기가 뇌 세포들을 직접적으로 활성화시킬 수 있는 충분한 자극을 제공한다는 것을 보여주었지만, 몇 가지 차이점이 있다. 우리는 과거 사전 연구⁴를 통해, 자극이 주어진 84초 중에서 마지막 21초 동안의 자극기에서만 뇌 활성도를 유도할 수 있다는 것을 알았고, 충분한 직류전기의 통전 시간이 필요하다는 것을 인식하여 본 실험에서는 18분의 자극기를 사전에 제공하고 난 후에 직류전기가 통전되는 동안의 뇌 활성도의 변화를 관찰하였다. 그 결과 사전 연구에서 활성화된 41의 부피소보다 두 배 이상 증가한 82의 부피소를 보였다. 또한 우리는 이러한 보다 효과적인 뇌 활성도를 유도한 것은 과거 실험에서 사용된 자극기(Phoresor® II Auto Model PM850, IOMED, US)와 다른 장비가 본 실험에 사용되었기 때문이라 생각된다. 본 실험에서 사용된 자극기(NeuroConn, Ilmenau, 독일)의 장점은 피

부와 접촉하는 전극에서 발생하는 저항 정도를 장비 자체적으로 감지하여, 저항값(impedance value)을 수치화하여 보여준다는 것이다. 따라서 본 실험에서는 저항 정도를 조절하여 미세한 직류전기가 체내에 용이하게 침투될 수 있는 실험 환경을 구현하였다.

앞서 언급한 바와 같이 경두개 직류전기 자극이 뇌 세포의 흥분성을 조작(manipulation)할 수 있으며, 작업 기억(working memory)과 언어 능력을 포함한 여러 인지 기능을 향상시킬 수 있고 암묵적 학습을 증진하는 많은 신경생리학적 증거들이 있다.^{8,10,13,24} 이와 더불어, 경두개 직류전기가 신체적 운동 수행 능력을 향상할 수 있다는 많은 연구들이 보고되고 있다.²⁵⁻²⁷ Cogiamanian 등²⁷은 1.5mA의 직류전기를 10분 동안 우측 뇌의 운동영역에 자극한 결과, 좌측 주관절의 최대 근수축력(maximal voluntary contraction)과 등척성 수축에 대한 지구력이 유의하게 증가되었다는 것을 보고하였고, 이는 직류전기가 피질 척수 신경 세포(corticospinal neuron)들을 지속적으로 자극한 결과라고 하였다. 또한 Boggio 등²⁵은 일차운동감각영역에 지속적인 직류전기 자극한 결과, 잼슨-데일러 손 기능 검사(Jebesen Taylor Hand Function Test)에서 자극하기 전에 비해 평균 9.41% 정도 손 기능이 향상되었다고 보고하였다. 특히 경두개 직류전기 자극이 정상인에서의 운동 기능 향상 뿐 아니라 뇌졸중 환자에서 상하지 운동 기능의 개선에 도움이 된다는 많은 연구들이 보고되고 있다.^{14,26,28,29}

현재 뇌졸중을 비롯한 많은 뇌 손상 질환들로 인한 인지 및 운동기능의 손상을 개선하기 위해 다양한 치료적 중재가 모색되고 있으며, 특히 반복적 경두개 자기 자극(repetitive transcranial magnetic stimulation), 근전도 유발 신경근 전기 자극(electromyography triggered neuromuscular electrical stimulation), 건측 억제 유도 치료(constraint induced therapy) 등과 같이 손상된 뇌 기능에 대해 뇌 가소성을 촉진시키고, 환자의 적극적인 참여가 유도된 반복적이고 집중적인 치료가 주목 받고 있다.^{3,5,30-32} 앞서 언급한 바와 같이, 경두개 직류전기 자극은 비침습적인 방법으로 선택한 뇌 신경 세포들을 직접적으로 자극하여 신경생리학적 및 신체 운동학적 기능을 촉진시킬 수 있기 때문에, 인지 및 운동 기능에 손상을 입은 뇌 손상 환자들을 위한 효과적인 치료법이 될 수 있을 것으로 생각된다. 또한 경두개 직류전기의 안전성이 확립되어 있고, 적용 방법이 쉬운 장점이 있어, 환자 스스로 재가에서 직접 적용한다면 경제적 효율성이 높은 치료가 될 것으로 보인다. 본 연구는 자기장의 영향을 받지 않은 장비를 활용하여 기능적 자기공명영상을 수집하는 동안, 경두개 직류전기 자극이 양전극 아래의 뇌 신경 세포들을 직접적으로 자극할 수 있다는 것을 보여 주었다. 그러나 적은 대상자의 수집으로 일반화가 어려운 점이 있으며, 실제 운동 기

능의 변화를 측정하지 않은 단점이 있다. 또한 직류전기의 자극 강도 및 자극 시간, 사후 효과의 지속 기간 등에 대한 명확한 기준과 증거가 존재하지 않는다. 따라서 향후 많은 대상자를 통해 통계적 일반화를 유추할 수 있고 경두개 직류전기의 효과를 최대화할 수 있는 기준에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

V. 결론

본 연구는 기능적 자기공명영상을 활용하여 경두개 직류전기 자극이 뇌세포의 활성화에 직접적인 영향을 줄 수 있는지를 연구하고자 하였고, 그 결과 양전극이 적용된 뇌반구의 일차운동 감각영역과 상부 두정엽에서 뇌 활성화도가 나타났다. 따라서 지속적인 경두개 직류전기 자극은 자극이 제공되는 부위의 뇌 세포들을 활성화하기에 충분한 역할을 할 수 있으며, 뇌 손상으로 인한 운동 기능 손상을 가진 환자들을 위한 효과적인 치료 방법이 될 수 있을 것으로 기대된다.

Author Contributions

Research design: Kwon YH

Acquisition of data: Kwon YH, Kim CS

Analysis and interpretation of data: Kwon YH

Drafting of the manuscript: Kwon YH

Administrative, technical, and material support: Jang SH, Kim CS

Research supervision: Jang SH, Kim CS

Acknowledgements

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2009-0064682).

참고문헌

1. Frick EM, Alberts JL. Combined use of repetitive task practice and an assistive robotic device in a patient with subacute stroke. *Phys Ther.* 2006;86(10):1378-86.
2. Jang SH, You SH, Hallett M et al. Cortical reorganization and associated functional motor recovery after virtual reality in patients with chronic stroke: An experimenter-blind preliminary study. *Arch Phys Med Rehabil.* 2005;86(11):

- 2218-23.
3. 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.
 4. Kwon YH, Ko MH, Ahn SH et al. Primary motor cortex activation by transcranial direct current stimulation in the human brain. *Neurosci Lett*. 2008;435(1):56-9.
 5. Shin HK, Cho SH, Jeon HS et al. Cortical effect and functional recovery by the electromyography-triggered neuromuscular stimulation in chronic stroke patients. *Neurosci Lett*. 2008;442(3):174-9.
 6. Nitsche MA, Paulus W. Excitability changes induced in the human motor cortex by weak transcranial direct current stimulation. *J Physiol*. 2000;527 Pt 3:633-9.
 7. Priori A, Berardelli A, Rona S et al. Polarization of the human motor cortex through the scalp. *Neuroreport*. 1998;9(10):2257-60.
 8. Paulus W. Transcranial direct current stimulation (tdcs). *Suppl Clin Neurophysiol*. 2003;56:249-54.
 9. Antal A, Nitsche MA, Kruse W et al. Direct current stimulation over v5 enhances visuomotor coordination by improving motion perception in humans. *J Cogn Neurosci*. 2004;16(4):521-7.
 10. Nitsche MA, Schauenburg A, Lang N et al. Facilitation of implicit motor learning by weak transcranial direct current stimulation of the primary motor cortex in the human. *J Cogn Neurosci*. 2003;15(4):619-26.
 11. Furubayashi T, Terao Y, Arai N et al. Short and long duration transcranial direct current stimulation (tdcs) over the human hand motor area. *Exp Brain Res*. 2008;185(2):279-86.
 12. Hesse S, Werner C, Schonhardt EM et al. Combined transcranial direct current stimulation and robot-assisted arm training in subacute stroke patients: A pilot study. *Restor Neurol Neurosci*. 2007;25(1):9-15.
 13. Monti A, Cogiamanian F, Marceglia S et al. Improved naming after transcranial direct current stimulation in aphasia. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 2008;79(4):451-3.
 14. Hummel F, Celnik P, Giraux P et al. Effects of non-invasive cortical stimulation on skilled motor function in chronic stroke. *Brain*. 2005;128(Pt 3):490-9.
 15. Nitsche MA, Nitsche MS, Klein CC et al. Level of action of cathodal dc polarisation induced inhibition of the human motor cortex. *Clin Neurophysiol*. 2003;114(4):600-4.
 16. Nitsche MA, Liebetanz D, Lang N et al. Safety criteria for transcranial direct current stimulation (tdcs) in humans. *Clin Neurophysiol*. 2003;114(11):2220-2; author reply 2-3.
 17. Baudewig J, Nitsche MA, Paulus W et al. Regional modulation of bold mri responses to human sensorimotor activation by transcranial direct current stimulation. *Magn Reson Med*. 2001;45(2):196-201.
 18. Lang N, Siebner HR, Ward NS et al. How does transcranial dc stimulation of the primary motor cortex alter regional neuronal activity in the human brain? *Eur J Neurosci*. 2005;22(2):495-504.
 19. Cramer SC, Bastings EP. Mapping clinically relevant plasticity after stroke. *Neuropharmacology*. 2000;39(5):842-51.
 20. Jang SH, Ahn YH, Kim SH et al. Corticospinal tract restoration: Combined study of diffusion tensor tractography, functional mri, and transcranial magnetic stimulation. *J Comput Assist Tomogr*. 2007;31(6):901-4.
 21. Oldfield RC. The assessment and analysis of handedness: The edinburgh inventory. *Neuropsychologia*. 1971;9(1):97-113.
 22. Lang N, Nitsche MA, Paulus W et al. Effects of transcranial direct current stimulation over the human motor cortex on corticospinal and transcallosal excitability. *Exp Brain Res*. 2004;156(4):439-43.
 23. Boros K, Poreisz C, Munchau A et al. Premotor transcranial direct current stimulation (tdcs) affects primary motor excitability in humans. *Eur J Neurosci*. 2008;27(5):1292-300.
 24. Antal A, Nitsche MA, Kincses TZ et al. Facilitation of visuo-motor learning by transcranial direct current stimulation of the motor and extrastriate visual areas in humans. *Eur J Neurosci*. 2004;19(10):2888-92.
 25. Boggio PS, Castro LO, Savagim EA et al. Enhancement of non-dominant hand motor function by anodal transcranial direct current stimulation. *Neurosci Lett*. 2006;404(1-2):232-6.
 26. Boggio PS, Nunes A, Rigonatti SP et al. Repeated sessions of noninvasive brain dc stimulation is associated with motor function improvement in stroke patients. *Restor Neurol Neurosci*. 2007;25(2):123-9.
 27. Cogiamanian F, Marceglia S, Ardolino G et al. Improved isometric force endurance after transcranial direct current stimulation over the human motor cortical areas. *Eur J Neurosci*. 2007;26(1):242-9.

28. Fregni F, Boggio PS, Mansur CG et al. Transcranial direct current stimulation of the unaffected hemisphere in stroke patients. *Neuroreport*. 2005;16(14):1551-5.
29. Hummel FC, Cohen LG. Non-invasive brain stimulation: A new strategy to improve neurorehabilitation after stroke? *Lancet Neurol*. 2006;5(8):708-12.
30. Kang JI, Baek HH, Shin HC. The effects of neuromuscular re-education on physical composition, blood lipid levels and physical motor function in stroke patients. *J Kor Soc Phys Ther*. 2003;15(4):208-34.
31. Kim JW, Kim SM, Park RJ. The effects of task-oriented functional training on standing balance in stroke patients. *J Kor Soc Phys Ther*. 2003;15(4):65-81.
32. Kim YM, Hwang YT, Park RJ. The effects of constraint-induced movement therapy on the involved hand function and adl in stroke patients. *J Kor Soc Phys Ther* 2005;17(4): 493-504.