

양극 경두개 직류 전기 자극이 중추신경원의 흥분성에 미치는 영향

■ 임영은, 정진선¹, 이정우¹

남동장애인종합복지관, ¹광주여자대학교 물리치료학과

Anodal Effects of Transcranial Direct Current Stimulation on the Excitability of Central Neuron

Young-Eun Lim, PT, MS; Jin-Sun Jung¹; Jeong-Woo Lee, PT, PhD¹

Namdong Welfare Center for the Disabled; ¹Department of Physical Therapy, Kwang-Ju Women's University

Purpose : This study is to examine the effects of transcranial direct current stimulation on the excitability of the central neuron.

Methods : This study selected 24 suitable women in their twenties. A positive electrode of transcranial direct current stimulation was placed on the primary motor area (M1) C4 and a negative electrode was placed on the left supraorbital. A stimulation of 0.04mA/cm² was applied for 20 minutes. H-reflex and V wave used diagnostic electromyography. An active electrode was placed at the muscle belly of the medial gastrocnemius muscle at a prone posture. An electrical stimulation was given to the posterior tibial nerve. Measurements were made before and after the stimulation. All data were analyzed with SPSS 12.0 and between each measuring before and after the change of the H-reflex and V wave amplitude.

Results : There were no significant differences in all H wave, M wave, and V wave amplitude before and after transcranial direct current stimulation. There were no significant differences in the change of H/M ratio and V/M ratio before and after transcranial direct current stimulation.

Conclusion : We know that transcranial direct current stimulation cannot have an influence on a normal grown-up person's central neuron.

Key words : Transcranial direct current stimulation, Central neuron, H-reflex, V wave

논문접수일 : 2011년 11월 28일

수정접수일 : 2011년 12월 6일

게재승인일 : 2011년 12월 12일

교신저자 : 이정우, jwlee@kwu.ac.kr

1. 서론

2006년 Vines 등¹의 연구를 비롯하여 뇌를 효과적으로 자극할 수 있는 방법에 대한 연구가 지속적으로 다루어 지고 있으며 대뇌 겉질에 대한 비침습적인 자극 방법으로 경두개 전기자극(transcranial electrical stimulation, TES)을 사용하고 있다. 비침습적 방법 중 신경자극인 경두개 직류 전기자극(transcranial direct current stimulation, tDCS)이 사용되고 있으며, 이는 운동 학습과 운동 수행력 향상을 위해 뇌의 겉질을

활성화시키는 방법으로 특정 신경 구조의 기능을 조절하고, 뇌의 가소성 및 재조직화를 유발시키는 것으로 알려지면서 많이 사용되고 있다.^{2,3}

경두개 직류 전기 자극은 약한 직류 전류를 사용함으로써 뇌 내의 전류의 흐름에 신경학적 활동성과 형태의 전환을 유발하는데 충분하며 매우 안전하고 효과적인 자극이다.⁴ 경두개 직류 전기 자극에 대한 최근 연구들에서는 자극이 뇌 손상 질환, 정신 질환, 신경 인성 통증 등에 중재된다고 한다.⁵ Kwon 등⁶의 연구에서는 경두개 직류 전기 자극을 통해 뇌 세포의 활성화가 일어나는지를 보기 위

해 기능적 자기공명영상을 활용하여 입증한 결과 직류전기 자극이 통전되었던 전극 바로 아래에 있는 뇌 영역인 일차운동감각영역과 상부 마루엽에서 활성도가 나타났다. 이러한 연구 결과는 경두개 직류 전기 자극이 신체적인 활동 능력과 뇌 활성도의 변화를 유도할 수 있다는 결과를 보였다.

대뇌 껍질의 안정막 전위를 흥분시키거나 억제시키는 조절은 극성에 따라 달라지며 양극은 해당부위 신경원의 흥분성을 증가시키며 음극은 감소시키는 기능을 갖고 있다.⁷ 그리고 자극의 세기는 1~2mA, 전극의 크기는 25~35cm²로 20~30분 동안 자극하였을 때 껍질 활성도 및 행동반응에 효과를 미친다고 보고되었다.^{6,8} Lim 등⁹의 연구에서는 1mA 강도로 크기가 7x5cm²인 전극을 사용하여 양극 경두개 직류 자극 후, 운동관련 껍질 전위 (movement related cortical potential, MRCP)의 측정 결과 변화가 유의하게 나타나 대뇌 껍질 신경원에 영향을 미치는 것을 알 수 있다고 보고하였다.

경두개 직류 전기 자극에 의한 흥분성의 변화는 약 10분에서 30분 까지 연속적으로 자극하였을 때에 신경생리학적인 효과가 자극이 끝난 후 약 90분까지 지속 된다.^{10,11} 이와 같은 비침습적 뇌 자극 기법인 경두개 직류 전기 자극술은 국소적으로 대뇌 껍질의 흥분성을 조절 하여 뇌 기능을 변화 시키고자 하는 목적으로 사용되고 있다.¹²

경두개 직류 전기 자극에 관한 연구 중 정상인을 대상으로 한 연구에서, Iyer 등¹³은 좌측 이마엽에 1mA로 10분간 양극 자극을 준 결과 작업 기억이 향상됨을 보고하였고, 환자를 대상으로 한 연구에서 Boggio 등¹⁴은 파킨슨병 환자의 좌측 이마엽에 2mA로 20분간 양극 경두개 직류 전기로 자극한 결과, 작업 기억력이 향상됨을 보고하였다.

Cogiamanian 등¹⁵은 1.5mA의 직류 전기를 10분 동안 우측 뇌의 운동영역에 자극한 결과, 좌측 팔꿈관절의 최대 근수 축력이 증가되었으며, 이는 직류 전기가 껍질 척수신경 세포들을 지속적으로 자극한 결과라고 보고하였다.

경두개 직류 전기 자극을 통하여 손의 행동반응에 미치는 영향을 알아보는 연구에서는 0.029mA/cm²의 크기로 양극 자극 후 손의 기능적 평가 방법인 Jebsen-Taylor hand function test (JTT)로 평가한 결과 손의 기능 향상에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.¹⁶

이처럼, 경두개 직류 전기 자극을 이용 하여 대뇌 껍질의 흥분성, 작업기억 능력, 운동 수행력 향상에 관한 연구들이 많이 이루어진 반면,¹⁷ 경두개 직류 전기 자극이 대뇌 껍질 외 중추신경원 중 척수 운동신경원의 흥분성이나 원심성 신경로(efferent neural drive)

의 전도성에 미치는 영향에 관련된 연구는 거의 보고되지 않았다. 척수 신경원의 흥분성을 알아 보기 위한 검사 방법인 H반사는 척수의 전각 세포와 운동 신경을 경과하여 발생하는 반사를 검사하는 방법이며 중추를 통한 단일연접반사로 말초의 감각신경과 운동 신경계에 기능적으로 중요한 정보를 제공한다.¹⁸ H반사는 상지에서 손목 근(C7), 하지에서는 장딴지 근(S1)에서 반응을 주로 기록 한다.¹⁹

H파가 소멸되는 시점에서 최대 수의적 근 수축 시 나타나는 V파는 대뇌 껍질의 수의적 움직임과 관련된 하행성 운동신경의 주행과 구심성 Ia 척수회로의 흥분성을 조절하는 상척수신경원의 흥분성 연구에 활용할 수 있다.²⁰ H_{max}/M_{max} 비(ratio)는 척수신경원 흥분정도를 간접적으로 표현하며 척수운동 신경원의 전체적인 동원률을 나타내고 지구력 훈련의 적합한 지표가 된다.²¹ 또한 임상적으로 경직에 대한 진단이나 치료에 대한 효과를 평가하기에 있어 유용하게 사용되고 있다.²² V_{max}/M_{max} 비는 하행성 운동 주행로의 활성도에 따른 α-운동신경원의 흥분분도와 양을 나타내는 정확한 지표라 할 수 있다.²³

따라서, 본 연구에서는 대뇌 껍질에 경두개 직류 전기 자극을 실시하여 이러한 자극이 직접적인 대뇌 껍질의 변화뿐 아니라 간접적으로 중추신경원의 흥분성에 미치는 영향을 알아보고자 실시하였다.

II. 연구방법

1. 연구대상

본 연구는 20대 여성을 대상으로 실험에 지원한 24명을 선발하였다. 실험을 하기에 앞서 대상자들에게 실험에 대해 충분한 설명을 하고 실험 참여 동의서를 받은 후 연구를 진행하였다. 대상자들은 실험에 영향을 줄만한 혈압, 심박수에 영향을 미치는 약물을 복용하지 않는 사람, 심혈과 질환, 자율신경 이상 증상 징후가 없는 사람, 신경학적 또는 근육 뼈대 계 이상이 없는 사람, 운동 및 감각 기능이 정상인 사람, 정신과적 질환의 과거력과 현 병력이 없는 사람, 오른쪽 다리가 우세측인 사람으로 선정하였다. 연구대상자의 평균 연령 21.6±0.9세, 평균 신장 160.1±4.3cm, 평균 체중은 56.1±5.9kg이었다(표 1).

표 1. 대상자들의 일반적 특성

특성	평균±표준편차	최소값	최대값
연령(세)	21.6±0.9	20	24
신장(cm)	160.1±4.3	153	170
체중(kg)	56.1±5.9	48	74

2. 실험방법

1) 양극 경두개 직류전기 자극 방법

양극 경두개 직류전기 자극에 사용된 기기는 Endomed 482(Enraf-Nonious Co., 네덜란드)로 하였다. 경두개 직류 전기 자극은 대상자가 편안하게 앉은 자세에서 적용하였다. 전극은 탄소 고무 전극으로 크기는 4x6cm²로 전극을 부착 하기 전 식염수를 충분히 적신 후 국제 10-20 배치 법에 따라 양극전극은 일차 운동 영역(M1)인 C4에 배치하고, 음극은 비 우세 측인 왼쪽 상안 와부에 배치하였다. 통전 시 자극의 강도는 0.04mA/cm², 총 적용 시간은 20분 동안 지속적으로 전기 자극을 실시 하였다.

2) 측정방법

중추신경원 흥분성을 측정하기 위해 사용된 기기는 Neuro-MEP4 (Neurosoft Ltd, 러시아)를 사용 하였다. 사용된 전극은 일회용 접착식 전극(Neurosoft Ltd, 러시아)으로 소인 속도 (sweep speed)는 10msec/division, 증폭도(gain)는 15mV로 설정하였다. 측정을 위해 실험실 온도는 24~26℃, 습도는 50~70%로 설정하였다.

대상자는 엎드려 누운 자세에서 발목 관절의 움직임을 방해하지 않도록 하기 위해 왼쪽 발목관절 중립부를 검사 침대 끝에 걸쳐놓았다. 먼저 알코올로 피부를 깨끗이 닦고, 습기가 없도록 건조시킨 후 왼쪽 다리에 전극을 부착하였다.

활동전극은 오금과 정강뼈의 내측복사 사이를 연결한 선상의 정중앙부에, 기준 전극은 발꿈치 힘줄 위에, 접지전극은 활동 전극에서 3cm 위의 장딴지 근 가쪽갈래 위에 배치하였으며, 자극부위는 정강 신경을 자극하였다. 전기자극 시 맥동 시간은 0.5ms로 설정하고, 2초에 2mA씩 자극을 증가시켜 H파 및 M파의 최대 진폭 및 잠복시를 측정하였다.

V파의 측정은 H파 측정과 마찬가지로 같은 조건과 자세에서 M파 최대진폭이 나타날 때, 대상자에게 최대 발목관절 발바닥쪽 굽힘을 하게 하여 V파를 측정하였다.

H_{max}/M_{max} 진폭 비는 H반사를 구한 후 조금 더 증가시켜 최대 M파의 반응을 얻는 강도를 정하고 각각의 양극정점과 음극정점 사

이를 측정하여 구하였으며 V_{max}/M_{max} 진폭비 역시 수집된 신호를 분석하여 구하였다.

3. 자료분석

자료의 통계분석은 SPSS/window (version 12.0)을 이용하여 분석하였다. 각 측정 항목들에 대해 단일 콜모고로프-스미노프검정을 실시한 결과 모두 정규분포 가정을 만족하였다. 따라서 각 측정 항목들 간의 전·후에 따른 변화 차이는 대응 표본 t검정(paired t-test)을 이용하였으며, 유의수준 α는 0.05로 설정하였다.

III. 결과

1. 최대 진폭의 변화

M파의 진폭은 자극 전 평균 18.22±7.27mV, 자극 후 평균 18.55±6.73mV로 유의한 차이가 없었으며, H파의 진폭은 자극 전 평균 8.17±3.09mV, 에서 자극 후 평균 8.39±3.00mV 로 유의한 차이가 없었다. V파의 최대 진폭은 자극 전 평균 3.08± 1.85mV, 자극 후 평균 3.33±1.76mV로 유의한 차이가 없었다(표 2).

표 2. 최대 진폭의 변화

	Pre	Post	t	p
M	18.22±7.27	18.55±6.73	-0.359	0.723
H	8.17±3.09	8.39±3.00	-0.769	0.450
V	3.08±1.85	3.33±1.76	-0.635	0.532

(단위: mV)

2. 최대 진폭비의 변화

H_{max}/M_{max} 진폭비는 자극 전 45.51±17.12%에서 자극 후 평균 49.81±16.81%로 증가하는 경향을 보였지만, 통계적으로는 유의한 차이가 없었다. V_{max}/M_{max} 진폭비는 자극 전 10.62±12.32%에서 자극 후 평균 11.72±21.16% 로 통계적으로 유의한 차이가 없었다(표 3).

표 3. 최대 진폭비의 변화

	Pre	Post	t	p
H _{max} /M _{max}	45.51±17.12	49.81±16.81	-1.889	0.072
V _{max} /M _{max}	10.62±12.32	11.72±21.16	-0.362	0.721

(단위: %)

IV. 고찰

본 연구는 양극 경두개 직류 전기 자극이 중추신경원의 흥분성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 H반사와 V파의 흥분성을 알아보았다. 본 연구에서 모든 진폭은 통계적으로 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났으나 증가하는 양상을 보였다. Lee 등²⁴의 연구에서 경두개 자기 자극 후 M 파의 변화는 자극 강도의 역치를 기준으로 자극함으로써 변화를 볼 수 있었지만, 본 연구에서는 정해진 강도로 자극을 제공함으로써 실험군 개인의 역치값에 도달하지 못하였을 수 있으며 그에 따른 충분한 자극이 제공되지 않을 가능성을 보인다.

H 반사는 구심성 신경 섬유가 각 신경인 Ia 신경 섬유를 거쳐 척수의 후각으로 들어가 척수 내에서 단일 시냅스 반사 궁을 거쳐 운동 신경인 알파운동신경 섬유를 타고 돌아오는 반사이다.¹⁸ Han²⁵의 연구에서 말초신경 병변 환자를 대상으로 정강신경에 직접적인 저주파 자극을 주어 말초 신경의 전기자극에 의한 H 파의 진폭이 증가하는 경향을 보였고 본 연구에서도 마찬가지로 대뇌 겉질의 비침습적 자극에도 H 파의 진폭이 증가하는 양상을 보여 척수 신경원의 흥분성에 영향을 미치는 것으로 보인다.

V파의 진폭변화는 상척수신경원의 흥분성 변화 연구에 사용된다.²³ Moon 등²⁶ 전기 자극에 의한 최대 수축에서의 변화는 있었으나 크지 않았다고 보고되었고 본 연구에서 V파의 진폭이 증가하는 양상을 보였으나 통계학적으로 유의하지 않아 상척수신경원의 흥분성에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 보인다.

Palmieri 등²⁷은 척수운동신경원 흥분성의 변화는 H파의 진폭변화를 측정하는 것이 가능하며, H_{max}/M_{max} 진폭비 산출이 가장 정확하다고 보고하여 H_{max}/M_{max} 진폭비의 평가가 척수운동신경원 흥분성의 평가에 있어서 중요한 것으로 알려져 있다. Hwang 등²⁸의 연구에서는 평류 전정 자극 전·후 장딴지근에서 H_{max}/M_{max} 진폭비를 비교한 결과 자극 전에 비해 자극 후에 유의하게 증가되어 평류 전정자극이 전정 척수로와 척수 신경원의 흥분성에 영향을 미치는 것으로 보고 하였다. 본 연구에서 H_{max}/M_{max} 진폭비에서는 양극 경두개 직류 전기 자극 후 대상자들이 어느 정도 일관성 있게 증가하는 경향을 보였으나 통계적으로 유의한 차이는 없었다.

V_{max}/M_{max} 진폭비에서는 양극 경두개 직류 전기 자극 후 증가하는 경향을 보였으나 통계적으로 유의한 차이는 없었다. Moon 등²⁹의 연구에서 V_{max}/M_{max} 진폭비의 변화는 수의적 수축력을 최대로 하였을 때 가장 크게 나타났으며, 전기자극에 의한 수축에서는 최대 수축력에서 어느 정도 변화는 있었으나 수의적 수축에 의한 변

화에 비하여 크지 않았다. 이러한 결과는 정상성인에게 양극 경두개 직류 전기 자극 후 V_{max}/M_{max} 진폭비에 있어서 원심성 신경로에 유의한 영향을 미치지 어려운 것으로 생각된다. 따라서 수의적 수축력이 증가할수록 상척수신경원의 활동전위의 변화에 크게 영향을 주는 것으로 나타났으나, 전기 자극에 의한 근 수축이 상척수신경원에 영향을 주려면 최대 수축력이 유발할 수 있는 정도의 강도에 이르러야 할 것으로 생각된다.

본 연구에서는 H_{max}/M_{max} 진폭비의 증가율이 V_{max}/M_{max} 진폭비 증가율보다 높은 것으로 수의적 수축의 영향보다 척수내 단일연접 반사에 관한 비교연구가 추후 의미가 있을 것으로 보인다. 따라서 대뇌 겉질의 비침습적 전기 자극으로 인해 원심성 신경로에 유의한 변화를 주기에 어려움이 있었고 이는 경두개 직류 전기자극을 통해 손의 기능을 변화시키는 결과들과 비교하여 상이한 것으로 추후 지속적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

V. 결론

본 연구는 양극 경두개 직류 전기 자극이 정상 여성의 중추신경원 흥분성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 실시한 결과 양극 경두개 직류 전기자극은 간접적으로 중추신경원의 흥분성에는 영향을 크게 미치지 않음을 알 수 있었다. 그러나 척수운동신경원의 흥분성을 나타내는 H_{max}/M_{max} 진폭비에서 증가하는 양상으로 볼 때 이러한 자료들이 향후 중추신경계 병변환자들을 대상으로 영향을 미칠 수 있을 것으로 보이며 꾸준한 연구가 필요하다. 중추신경계뿐 아니라 비침습적이며 편리한 경두개 직류 전기자극이 말초신경계의 전도와 흥분성에 미치는 영향에 대한 연구의 확대가 필요하다.

참고문헌

1. Vines BW, Nair DG, Schlaug G. Contralateral and ipsilateral motor effects after transcranial direct current stimulation. *Neuroreport*. 2006;24(17(6)):671-674.
2. Alonso-Alonso M, Fregni F, Pascual-Leone A. Brain stimulation in poststroke rehabilitation. *Cerebrovasc Dis*. 2007;24(1):157-66.
3. Antal A, Bormpohl F, Boggio PS et al. Anodal transcranial direct current stimulation of prefrontal cortex enhances working memory. *Exp Brain Res*.

- 2005;166(1):23-30.
4. Kim YH. The Effects of transcranial direct current stimulation on neuroplasticity and functional recovery in spinal cord contusion model of rats. Dongshin University. Dissertation of Doctorate Degree. 2010.
 5. Nitsche MA, Paulus W. Sustained excitability elevations induced by transcranial dc motor cortex stimulation in humans. *Neurology*. 2001;57(10):1899-901.
 6. Gwon YH, Jang SH, Kim JS. Cortical activation in the human brain induced by transcranial direct current stimulation. *The Journal of Korean Academy of Physical Therapy Science*. 2009;21(4):73-9.
 7. Arai N, Furubayashi T, Hamada M 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.
 8. Go MH, Wassermann EM, Kim YH et al. Improvement of apraxia and hand function with transcranial direct current brain polarization in patients with corticobasal degeneration. *The Journal of Korean Academy of Rehabilitation Medicine*. 2007;31(3):278-82.
 9. Kim SH, Kim TY, Yang DJ et al. Change of cerebral motor area activity by anodal transcranial direct current stimulation. *The Journal of Korean Academy of Physical Therapy Science*. 2009;21(4):65-71.
 10. Nadia B, Pascual-Leone A. Using non-invasive brain stimulation to augment motor training-induced plasticity. *NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2009;6(8).
 11. Jeffery DT, Norton JA, Roy FD et al. Effects of transcranial direct current stimulation on the excitability of the leg motor cortex. *Exp Brain Res*. 2007;182(2):281-7.
 12. Schlaug G, Renga V, Nair D. Transcranial direct current stimulation in stroke recovery. *Arch Neurol*. 2008;65(12):1571-6.
 13. Grafman J, Iyer MB, Lomarev M et al. Safety and cognitive effect of frontal dc brain polarization in healthy individuals. *Neurology*. 2005;64(5):872-5.
 14. Boggio PS, Ferrucci R, Rigonatti SP et al. Effects of transcranial direct current stimulation on working memory in patients with parkinson's disease. *J Neurol Sci*. 2006;249(1):31-8.
 15. 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.
 16. Lim YE. Effect of hand function and cerebral motor area activity by transcranial direct current stimulation. Dongshin University. Dissertation of Master's Degree. 2009.
 17. Kwon YH, Kwon JW, Park SY et al. Cortical activation by transcranial direct current stimulation and functional electrical stimulation in normal subjects: case studies. *The Journal of Korean Society of Physical Therapy*. 2010;23(1):77-82.
 18. Yoo SH. Trunk Electromyography and H reflex during gait of hemiplegia after stroke. Daegu University. Dissertation of Master's Degree. 2008.
 19. Bodine SC, Carson SR, Cavnor C et al. Consistent repeated M- and H-wave recording in the hind limb of rats. *Muscle Nerve*. 1998;21(11):1405-13.
 20. Martin A, Pensini M. Effect of voluntary contraction intensity on the H-reflex and V-wave responses. *Neurosci Lett*. 2004;367(3):369-74.
 21. Mattews WB. Ratio of maximum H reflex to maximum M response as a measure of spasticity. *J Neurol Neurosurg Psychiat*. 1966;29:201-204.
 22. Babault N, Lucas B, Maffiuletti NA et al. Electrical and mechanical H (max)-to-M (max) ratio in power- and endurance-trained athletes. *J Appl Physiol*. 2001;90(1):3-9.
 23. Aagaard P, Andersen JL, Dyhre-Poulsen P et al. Neural adaptation to resistance training: Changes in

- evoked V-wave and H-reflex responses. *J Appl Physiol*. 2002;92(6):2309-18.
24. Lee SJ, Yoon TS, Hu Y. Modulation of H reflex and reciprocal inhibition of soleus muscle via electrical and transcranial magnetic stimulation of antagonist muscle. *The Journal of Korean Academy of Rehabilitation Medicine*. 2003;27(4):524-2.
25. Han SJ. Electrophysiologic changes of tibial nerve by low frequency stimulation in polyneuropathic patients. Ewha Womans University. Dissertation of Master's Degree. 1996.
26. Moon DJ, Jeong DI, Lee JW. The effects of muscle contraction by electrical stimulation to V-wave and median frequency. *Journal of the Korean Academy of Clinical Electrophysiology*. 2006;4(1):27-38.
27. Hoffman MA, Ingersoll CD, Palmieri RM. The Hoffmann reflex: methodologic considerations and applications for use in sports medicine and athletic training research. *J Athl Train*. 2004;39(3):268-77.
28. Hwang TY, Kim TY, Park JS. The change of H reflex by galvanic vestibular stimulation. *Journal of the Korean Academy of Clinical Electrophysiology*. 2004;2(3):65-73.
29. Kim KY, Kim SH, Moon DJ et al. Changes of action potential of central neuron by maximal voluntary isometric contraction. *The Journal of Korean Society of Physical Therapy*. 2006;18(3):37-45.