

Prefrontal Transcranial Direct Current Stimulation Enhances Visual Metacognition*

Dasom Kwon¹, MinSeok Hong¹, Soyong Eom², Do - Joon Yi^{1†}

¹Department of Psychology, Yonsei University

²Epilepsy Research Institute, Yonsei University College of Medicine

A randomized, sham-controlled, double-blind trial was conducted to test the effects of transcranial direct current stimulation (tDCS) to the left prefrontal cortex (PFC). Before and after 20-min anodal stimulation, visual judgment and confidence data were collected in a global dot motion perception task. With a signal detection theoretic analysis on an experimental design of the group as a between-participant factor and the test session as a within-participant factor, we found a significant increase of metacognitive efficiency ($M_{ratio} = meta-d'/d'$) in the stimulation group, but not in the sham group. Visual judgment accuracy, task difficulty, and confidence ratings did not differ either between groups or between test sessions. These results indicate that prefrontal tDCS selectively enhanced metacognitive performance while not affecting visual judgment and confidence bias. The current study provides empirical evidence for the usefulness of tDCS as a training and rehabilitation tool to enhance metacognition.

Keywords: metacognition, prefrontal cortex, tDCS, visual awareness

1차원고접수 21.11.05; 수정본접수: 22.01.24; 최종게재결정 22.01.24

우리는 늘 자신의 내면 상태를 살펴본다. 특히 자신의 결정이 올바른지 그른지를 정확히 가늠하는 것이 중요한데, 결정에 확신이 서지 않으면 추가 정보를 탐색함으로써 실수를 줄이고 자원 낭비를 피할 수 있기 때문이다. 이렇게 올바른 결정과 잘못된 결정을 분간하는 능력을 메타인지(metacognition)라 한다(Metcalfe & Shimamura, 1994). 좋은 메타인지 능력을 갖춘 사람은 올바른 결정에 확신하고 잘못된 결정에 덜 확신하지만, 메타인지 능력이 부족한 사람은 올바른 결정이나 잘못된 결정이나 비슷한 정도의 확신감을 느낀다. 메타인지는 의식(Lau, 2008)과 인지조절(Shimamura, 2000), 사회적 관계(Frith, 2012)와 정신질환(Hamm et al., 2012)을 이해하는 데 필수적인 개념이다. 이에 메타인지를

향상시키는 방법과 이를 뒷받침하는 신경 메커니즘에 관한 연구가 필요하다.

지각과제의 맥락에서는 지각판단의 정확도와 그에 대한 확신도 평정을 비교하여 메타인지를 추정할 수 있다. 자극을 변별하는 과제를 '유형1(Type - 1) 과제'라 하고, 정반응과 오반응을 변별하는 과제를 '유형2(Type - 2) 과제'라 한다(Clarke et al., 1959). 따라서 정확도는 '유형1 반응'이고 확신도는 '유형2 반응'에 해당한다. 메타인지 능력이 좋을수록 유형1 반응과 유형2 반응은 높은 정적 상관관을 보인다(소위, 감마상관; Nelson, 1984). 그러나 상관값으로는 민감도와 반응편향을 구분할 수 없어서 신호탐지이론적인 접근이 필요하다(Macmillan & Creelman, 2004). Maniscalco와

* 본 연구는 한국연구재단(과학기술정보통신부 재원, 과제번호 2017M3C7A1031976)과 한국보건산업진흥원(보건복지부 재원, 과제번호 HI18C1166)의 지원을 받아 수행되었음.

† 교신저자: 이도준, (03722) 서울 서대문구 연세로 50 연세대학교 심리학과, E-mail: dojoon.yi@yonsei.ac.kr

Lau(2012)는 유형2 반응을 산출하는 유형1 자료의 민감도 d' 을 메타인지의 민감도로 정의하고, 이를 메타민감도 $meta - d'$ 으로 명명하였다. 메타민감도는 민감도와 같은 단위를 사용하기 때문에, 이를 사용하면 객관적 수행과 주관적 수행을 직접 비교하는 것이 가능하다. 여기서 두 값의 비율인 메타비율($M_{ratio} = meta - d'/d'$)은 메타인지의 효율성(metacognitive efficiency)을 가리킨다. 만약 유형1 판단의 정보가 유형2 판단에 온전히 전달되지 않으면(즉, 메타인지 효율성이 낮다면), 메타비율은 1보다 작은 값을 가지게 된다. 반대로 유형1 판단의 정보가 고스란히 유형2 수준으로 전달된다면, 메타비율은 1에 가깝거나 더 큰 값을 취할 수 있다. 즉, 메타인지 효율성은 유형1 수행(d')이 통제된 유형2 수행($meta - d'$)라고 할 수 있다. 따라서 이를 측정함으로써 유형1 수행이 서로 다른 조건이나 집단의 메타인지 수준을 비교할 수 있다.

메타인지는 전두엽의 기능과 밀접하게 연관된다(Shimamura, 2000). 전두엽 손상이 무시증을 비롯한 의식의 문제를 동반한다는 사실은 이미 잘 알려져 있다(Passingham, 1993). 특히, 전전두피질(prefrontal cortex, PFC)의 손상은 유형1 수행을 그대로 둔 채 유형2 수행만 악화시킬 수 있다. 가령, Del Cul 등(2009)의 실험에서 PFC 손상환자들은 차폐된 시각자극을 인식하는 데 정상인들보다 어려움을 겪었지만, 정상적인 수준의 변별 정확도를 보였다. 뇌손상부위를 비교했을 때는 좌측 전방부 손상이 심할수록 의식의 역치가 높은 것으로 드러났다. 이 결과는 정상인 대상의 연구와 잘 들어맞는다. 좌반구 배측전전두피질(dorsolateral prefrontal cortex; DLPFC)의 기능성 자기공명영상(functional magnetic resonance imaging; fMRI) 신호는 차폐된 시각자극에 관한 정상인의 의식 수준을 반영하였다(Lau & Passingham, 2006). 또한, 양반구 DLPFC에 대한 경두개 자기자극(transcranial magnetic stimulation; TMS)은 차폐된 자극에 대한 주관적 의식을 손상시켰으나 객관적 수행에는 영향을 끼치지 않았다(Rounis et al., 2010).

선행연구들은 주관적 의식이 줄어드는 상황에서 PFC의 역할을 검증했지만, 본 연구는 PFC를 자극하여 주관적 의식을 향상시킬 수 있는지에 관심을 두었다. 이에 건강한 참가자의 좌반구 PFC를 경두개 직류 자극(transcranial direct current stimulation; tDCS)을 가하고, 그 전후로 수행된 지각과제에서 정확도와 확신도를 측정하였다. 대략 15분 동안 경두개에 가해진 직류 자극은 2시간가량 자극부위의 흥분성을 변화시킨다(Fritsch et al., 2010). 양극(anodal) 아래 피질의 흥분성은 높아지고, 음극(cathodal) 아래 피질의 흥분성은 낮아진

다. 그러나 자극부위가 운동피질이 아닌 경우, 음극 자극이 지각과 인지 수행에 미치는 효과는 양극 자극보다 덜 안정적이다(Jacobson et al., 2012). 따라서 본 연구는 양극으로 20분간 자극받은 집단(자극집단, 'real' stimulation group)과 1분간 자극받은 집단(비자극집단, 'sham' stimulation group)을 비교하였다.

참가자들은 지각과제로서 점 운동에 대한 2-간격 강제선택(2-interval forced choice; 2IFC) 과제를 수행하였다. 매 시행 제시된 두 화면 중 전역적인 운동감(global motion)이 느껴지는 화면(유형1 반응)과 그에 대한 확신도(유형2 반응)를 차례로 보고하였다. 시각판단과 메타인지의 측정치는 집단(자극 대 비자극)을 참가자간 요인으로 하고 검사시점(사전검사 대 사후검사)을 참가자내 요인으로 하는 이원 혼합 설계에서 분석되었다. 메타인지의 조건 간 차이를 객관적인 수행의 차이로 귀인할 수 없도록 계단법 절차를 통해 모든 조건의 난이도를 일정하게 유지하였다(Lau & Passingham, 2006; Rounis et al., 2010). 만약 좌반구 PFC에 대한 양극 전류자극이 메타인지를 향상시킨다면, 자극집단은 사전검사보다 사후검사에서 더 큰 메타인지 효율성(메타비율, M_{ratio})을 보일 것이다. 비자극집단의 경우, 사전검사와 사후검사의 메타인지 효율성은 차이를 보이지 않을 것이다.

방 법

참가자

연세대학교 학생 커뮤니티에서 32명의 건강한 자원자를 모집하였다. 무작위로 절반의 참가자들은 자극집단(real group)에, 나머지 절반은 비자극집단(sham group)에 할당되었다. 비자극집단에 속하는 참가자 두 명이 분석에서 제외되었다. 한 명은 사전검사 중 절반 이상의 시행에서 응답하지 않았고, 다른 한 명은 M_{ratio} 추정치가 전체 참가자들의 평균에서 $3SD$ 이상 벗어났다. 그 결과, 자극집단은 16명(연령 $M = 23.4$, $SD = 2.5$; 여자 11명)으로 구성되었고 비자극집단은 14명(연령 $M = 23.9$, $SD = 2.6$; 여자 7명)으로 구성되었다. 연령과 성별비의 집단차는 통계적으로 유의하지 않았다(연령 $t_{28} = -0.46$, $p = 0.65$; 성별 $\chi^2_1 = 0.45$, Yates 연속성 보정 $p = 0.50$). 실험자는 실험 종료 전까지 참가자가 어느 집단에 속하는지 알 수 없었다(이중맹검, double blindness). 참가자는 참가동의서에 서명 후 실험에 참여하였고, 실험 후 금전적인 보상을 받았다. 참가자 모집 기준과 뇌전류자극 절차를 포함한 실험 방법은 연세의료원 강남세브란스병원 연구심의위원회에 의해 사전에 승인되었다

(3-2019-0403).

장치와 도구

실험은 어두운 일인용 부스에서 진행되었다. 참가자는 턱받침대에 머리를 고정된 상태로 70cm 떨어진 모니터 화면을 주시하였고, 자판을 이용하여 반응을 입력하였다. 시각판단 과제는 Matlab 환경에서 수행되었다. 자극제시와 반응수집을 위해 PsychToolbox - 3 툴박스를 활용하였고(Brainard, 1997), 계단법 절차를 위해 Palamedes 툴박스를 활용하였다(Prins & Kingdom, 2018).

시각자극과 과제

시각판단 과제의 각 시행에서는 200ms 동안 지속되는 점 운동 화면 두 개가 차례로 제시되었다(Figure 1A). 각 운동 화면은 16.7ms 간격의 프레임 12개로 구성되었다. 개별 프레임에는 고리 형태(내외부 직경 각 1.5° 와 6°)의 영역 안에 100개의 점이 흩어져 있었다. 각각의 점(직경 0.15° 의 백색 원)은 무작위로 신호나 잡음에 배정되었다. 신호 점들은 미리 정해진 방향으로 초당 25° 만큼 이동했고(coherent motion), 잡음 점들은 무작위로 정해진 새 위치로 이동했다(random motion). 가령, 일관성 수준(coherence level)이 12%일 때, 점 12개가 한 프레임에서 다음 프레임으로 바뀔 때 미리 정해진 방향으로 움직였고, 그다음 프레임으로 바뀔 때는 다른 12개의 점이 같은 방향으로 움직였다. 신호 점들의 운동 방향은 기본 방향(cardinal direction)이 아닌 여섯 가지 값(68° , 113° , 158° , 248° , 293° , 338°) 중에서

결정되었다(Shibata et al., 2012). 이 값은 참가자마다 달랐지만, 한 참가자 내에서는 일정했다.

한 시행은 응시점(0.3° 크기, 하얀 '+')이 0.5초 동안 출현하면서 시작되었다. 이후, 점 운동 화면 두 개가 0.2초 간격으로 연달아 제시되었다. 한 화면에는 신호와 잡음이 섞여 있었고, 다른 화면에는 잡음만 있었다. 신호는 두 화면에서 같은 빈도 등장했고, 그 순서는 무작위로 결정되었다. 참가자는 신호를 포함한 운동 화면의 순서를 2초 안에 보고해야 했다(시각판단; '1' 또는 '2'). 반응이 입력되면 1초 후에 새로운 시행이 시작되었다.

실험이 시작되면 참가자는 먼저 연습시행 16회를 수행하였다. 이때는 오반응에 대해 경고음이 피드백으로 제시되었다. 그다음, 피드백 없이 연습시행 120회를 추가로 수행하였다. 연습이 진행되는 동안, 두 개의 계단법 알고리즘으로 점 운동의 일관성 수준을 조절하였다. 시각판단이 틀릴 때마다 신호 점을 한 개 늘리고, 두 번 연달아 맞을 때마다 신호 점을 두 개 줄였다('1-up-2-down'). 한 계단법은 50% 일관성 수준에서 시작하고 다른 계단법은 5%에서 시작하였다. 두 계단법을 포함하는 시행의 순서는 무작위로 결정되었다. 매 40 시행 후에 짧은 휴식이 주어졌다.

연습이 끝나면 사전검사(pre-test)로서 본시행 240회가 시작되었다. 본시행에서는 시각판단 반응이 입력되면, 그에 관한 확신도를 묻는 척도 '1(50%)–2–3–4(100%)'가 제시되었다. 이때, 참가자는 시각판단에 관한 확신도를 3초 안에 보고해야 했다. 전혀 확신하지 못하면(즉, 맞았을 가능성이 50%) '1'을 누르고, 조금 확신하면 정도에 따라 '2'와 '3',

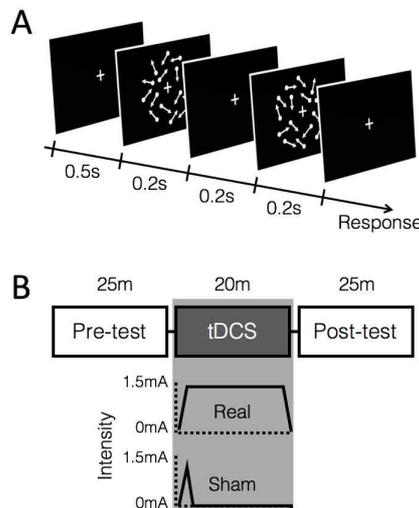


Figure 1. Procedure. Experimental paradigm. (A) The visual motion discrimination task. After two motion displays, participants reported which display contained coherent motion. Thereafter, they provided a confidence rating on a scale of 1 (low confidence) to 4 (high confidence). (B) The tDCS procedure. Both real and sham groups completed the task before and after the tDCS session.

완전히 확신하면(맞았을 가능성이 100%) '4'를 눌렀다. 연습 시행에서 제시된 일관성 수준 값들의 20%와 80% 백분위수를 두 계단법의 시작값으로 사용하였다. 본시행 동안 피드백은 주어지지 않았다. 나머지 방법은 연습시행과 같았다. 사전검사 후에는 tDCS 세션과 사후검사(post-test)가 순서대로 진행되었다(Figure 1B). 사후검사는 사전검사와 같은 방법으로 진행되었다.

tDCS

충전지로 작동하는 정전류(constant current) 자극기와 한 쌍의 전도성 스펀지 전극(지름 6cm 원형)이 사용되었다(YBRAIN YMS-201B, Seongnam, South Korea). 양극(anodal)을 10-20 시스템의 F3 위치에 부착하고, 음극(cathodal)은 우측 입꼬리에서 3cm 떨어진 뺨 부위에 부착하였다. 두 전극을 식염수에 적시고 밴드를 사용하여 자극 부위에 고정하였다. 전류자극의 강도는 처음에는 1.5mA에 이를 때까지 30초간 서서히 증가하고 마지막 30초간 서서히 감소하였다(Figure 1B). 자극(real) 집단에서는 전류자극이 중간 19분 동안 1.5mA에 머물렀다. 비자극(sham) 집단에서는 전류자극이 처음 30초 동안 1.5mA에 이른 후 30초간 다시 줄어들었으며, 나머지 19분간 전류자극이 가해지지 않았다. 총 20분의 tDCS 세션 동안 참가자는 이완된 상태로 휴식을 취하였다.

결 과

신호탐지이론 민감도(d')와 메타민감도($meta-d'$)를 얻기 위해 Maniscalco와 Lau(2012)가 공개한 Matlab 코드(http://www.columbia.edu/~bsm2105/type2sdt/fit_meta_d_MLE)를 사용하여 개별 참가자의 자료에 대해 최대우도추정을 실시하였다. 그 외 모든 분석은 R 환경에서 진행되었다.

집단(자극 대 비자극)을 참가자간 요인으로 하고 검사시점(사전검사 대 사후검사)을 참가자내 요인으로 하는 2x2 혼합 변량분석은 afex 패키지의 aov_ez 함수를 사용하였고, 필요 시 사후검정은 emmeans 패키지의 emmeans 함수를 사용하였다.

먼저 네 가지 실험조건의 시각적 난이도가 비슷한 수준으로 유지되었는지 확인하기 위해 시각판단 반응을 분석하였다. 모든 조건의 정확도는 대체로 1-up-2-down 계단법의 기대값인 70.7% 가까이에서 유지되었다(Levitt, 1971). 자극집단의 정확도(사전검사 70.6%, 사후검사 70.2%)보다 비자극집단의 정확도(사전검사 73.7%, 사후검사 71.3%)가 수치상 더 높았지만, 주효과와 상호작용이 모두 통계적으로 유의하지 않았다($p's > .2$). 이러한 결과는 시각판단의 정확도가 적절하게 통제되었음을 의미한다.

계단법에 의해 정확도가 고정되었으므로 tDCS가 시각판단에 영향을 주었다면, 그 효과는 점 운동의 일관성 수준(coherence levels)에 반영되었을 것이다. 그러나 일관성 수준의 조건간 차이는 주목할 만큼 크지 않았다(Figure 2A). 자극집단의 일관성 수준(사전검사 0.18, 사후검사 0.18)보다 비자극집단의 일관성 수준(사전검사 0.21, 사후검사 0.19)이 수치상 더 높았지만, 주효과와 상호작용이 모두 통계적으로 유의하지 않았다($p's > .2$). 정확도 결과와 더불어, 이 결과는 유형1 과제 수행이 메타인지 측정치를 오염시켰을 가능성을 배제한다.

tDCS는 시각판단이 아니라 전반적인 확신도 수준에 영향을 끼쳤을 가능성이 있다(Shekhar & Rahnev, 2018). 그러나 조건별 확신도를 분석한 결과는 이러한 예상과 달랐다(Figure 2B). 확신도 평정값은 자극집단(사전검사 2.29, 사후검사 2.27)보다 비자극집단(사전검사 2.71, 사후검사 2.59)에서 더 높은 경향이 보였지만(집단의 주효과, $F_{1,28} = 3.92, p = .058, \eta_p^2 = .123$), 그 차이가 검사시점에 따라 달라지지는

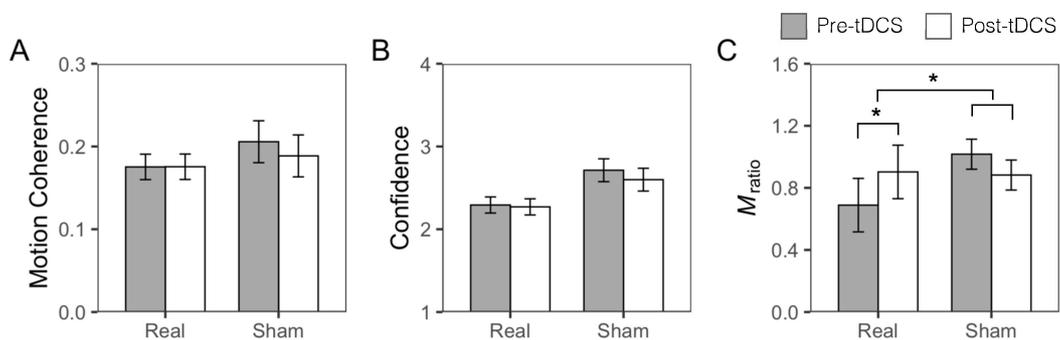


Figure 2. Results. tDCS effects on motion coherence (A), confidence (B), and M_{ratio} . Error bars represent the within-participant 95% confidence intervals. * $p < 0.05$.

않았다(상호작용, $p > .4$). 사전검사와 사후검사의 확신도 수준도 유의하게 다르지 않았다(검사시점의 주효과, $p > .2$). 즉, 전반적인 확신도 수준은 tDCS의 영향을 받지 않았다.

다음으로, 신호탐지이론의 민감도(d)과 메타민감도($meta-d$)를 분석하였다. 두 측정치 모두 통계적으로는 앞서 보고한 정확도 결과와 같은 양상을 보였다. 민감도는 자극집단(사전검사 1.21, 사후검사 1.18)보다 비자극집단(사전검사 1.37, 사후검사 1.22)에서 더 높았지만, 주효과와 상호작용이 모두 통계적으로 유의하지 않았다(p 's $> .2$). 메타민감도도 자극집단(사전검사 0.85, 사후검사 0.99)보다 비자극집단(사전검사 1.35, 사후검사 1.06)에서 더 높았다. 단지, 비자극집단의 메타민감도가 사전검사에서 비교적 높게 측정되어 집단과 검사시점의 상호작용이 유의미한 경향성을 보였다($F_{1,28} = 3.89$, $p = .059$, $\eta_p^2 = .122$). 두 주효과는 유의하지 않았다(집단의 주효과, $p > .1$; 검사시점의 주효과, $p > .5$). 메타민감도에는 민감도 수준이 반영되어 있으므로, 그 자체만으로는 제1유형 반응을 배제하고 제2유형의 반응 특성만을 파악하기가 어렵다(Maniscalco & Lau, 2012). 이에 메타민감도와 민감도의 비율인 메타비율(M_{ratio})을 계산하였다.

조건별 메타비율을 Figure 2C에 제시하였다. 집단의 주효과와 검사시점의 주효과는 모두 통계적으로 유의하지 않았지만(p 's $> .2$), 두 요인의 상호작용은 유의하였다($F_{1,28} = 6.56$, $p = .016$, $\eta_p^2 = .190$). 자극집단의 메타비율은 사전검사(0.69)에 비해 사후검사(0.90)에서 증가했으나($t_{28} = 2.30$, $p = 0.029$), 비자극집단의 메타비율은 사전검사(1.02)와 사후검사(0.88)에서 유의미한 변화가 없었다($p > .1$). 이러한 결과는 전전두피질의 tDCS가 메타인지의 효율성을 향상시켰음을 의미한다.

논 의

양극의 직류로 PFC를 자극했을 때 시각판단의 메타인지 효율성이 향상되었다. 이 효과가 주의나 각성을 매개로 발생했을 가능성은 낮다. 시각과제의 정확도(d)와 점 운동의 일관성 수준이 집단과 검사시점에 따라 다르지 않았기 때문이다. 전반적인 확신도 수준의 변화로도 본 결과를 설명하기는 어렵다. 자극집단의 확신도가 비자극집단보다 낮은 경향이 있었지만, 집단과 검사시점의 상호작용 효과는 통계적으로 유의미하지 않았다. 따라서 PFC에 대한 tDCS 처치효과는 유형1 반응의 정확도나 편향에 오염되지 않고 자극집단의 메타인지적 변화를 반영한다고 볼 수 있다. 본 연구의 결과는

뇌손상(Del Cul et al., 2009)이나 TMS(Rounis et al., 2010)로 인한 PFC 기능 저하가 객관적 정확도를 보존한 채 주관적 의식만 방해한다는 선행연구 결과와 잘 들어맞는다.

많은 이론과 실험들에서 PFC와 시의식의 관계가 강조되었다. 가령, '전역적 신경 작업공간 이론(Global Neuronal Workspace Theory)'은 PFC가 신경 연결망의 허브로서 시각 신호를 전역적으로 전파함으로써 의식적 경험을 산출한다고 본다(Dehaene et al., 2006). 그러나 전역적 신경 전파는 시각판단의 정확도 역시 향상시킬 것으로 예상되므로, 정확도 변화 없이 메타인지 효율성만 향상된 본 실험 결과와 잘 어울리지 않는다. 이러한 해석은 전역적 작업공간의 표상이 메타인지 요소를 갖춰야 한다는 수정 모형의 입장과 부합한다(Shea & Frith, 2019). 하지만 이에 관한 신경해부학적 가설은 아직 제시된 바 없다. 이에 비해, '고차 이론(Higher-Order Theory)'은 PFC가 일차적(first-order) 감각 표상을 점검하여 의식의 내용을 결정한다고 본다(Brown et al., 2019; Lau & Rosenthal, 2011). 일차 표상은 시각판단의 정확도를 결정하지만, 그 자체로는 의식될 수 없고, PFC를 통해 이차적(second-order) 메타표상으로 전환되어야 의식될 수 있다. 따라서 고차 이론은 유형1 수행이 보존되면서 유형2 수행이 변하는 상황을 설명할 수 있다.

고차 이론은 PFC의 앞부위(anterior PFC; aPFC)와 배측부위(DLPFC)의 역할을 구분한다. 선행연구에서 aPFC의 회백질 부피(Fleming et al., 2010)와 연결성(Baird et al., 2013)이 메타인지의 개인차와 정적상관을 보인 바 있다. DLPFC도 앞서 기술한 바와 같이 유형1 수행을 통제된 메타인지 실험에서 주목을 받아왔다(Lau & Passingham, 2006; Rounis et al., 2010). 최근 Shekhar와 Rahnev(2018)는 TMS 실험을 통해 DLPFC가 지각정보를 판독하여 전달하면 aPFC가 지각정보와 비지각정보를 통합하여 확신도를 결정한다고 제안하였다. 이 실험에서 DLPFC에 TMS를 가하면 시각판단의 확신도 평정값이 감소했다. DLPFC 기능이 저하되어 지각정보의 양을 파악할 수 없게 되면서 aPFC가 확신도를 낮춘 것이다. 한편, aPFC에 TMS를 가하면 메타비율(M_{ratio})이 높아졌다. 이는 aPFC가 비지각정보를 통합할 수 없게 되면서 확신도 판단에 반영되는 지각정보의 비중이 커졌기 때문이라 볼 수 있다(Shekhar & Rahnev, 2018).

아쉽게도 본 연구의 결과를 Shekhar와 Rahnev(2018)와 직접 비교하기는 어렵다. 본 연구의 양극 전극은 10 - 20 시스템의 F3에 위치했으므로 DLPFC보다 aPFC에 더 가깝다고 할 수 있다(Okamoto et al., 2004). 그러나 Shekhar와 Rahnev(2018)가 TMS로 자극한 aPFC와 DLPFC는 불과

2.6cm 거리에 있었다. tDCS의 낮은 공간해상도를 감안할 때, 두 영역이 모두 양극 전류의 자극을 받았다고 보는 것이 타당하다. 게다가 F3은 좌반구에 속하지만 Shekhar와 Rahnev(2018)는 우반구 영역만 자극하였다. 아직 메타인지 기능의 좌우반구 차이는 체계적으로 관찰된 바 없다. 따라서 후속 연구에서는 공간해상도가 향상된 tDCS 기법(예, focal tDCS)을 활용하여 좌우반구 PFC 자극을 비교함으로써 메타인지를 더욱 효과적으로 향상시킬 방안을 탐색할 필요가 있다.

마지막으로, 본 연구의 사전검사에서 관찰된 집단간 차이를 언급할 필요가 있다. 집단 무선험당, 이중맹검, 그리고 계단법을 적용했음에도 불구하고, 사전검사에서 자극집단보다 비자극집단의 측정치들이 더 높았다. 그 차이들은 모두 통계적으로 유의미하지 않았지만, 비교적 일관적으로 관찰되었다는 점에서 전체 결과의 해석을 제약할 수 있다. 이에 후속 연구에서는 tDCS 이전의 조건 차이를 최소화하는 조치가 필요하다. 가령, 사전검사의 연습시행을 늘이거나, 더 많은 수의 참가자를 모집할 수 있다. 또는 동일 집단의 참가자에게 충분한 시간 간격을 두고 자극 실험과 비자극 실험에 모두 참여하게 함으로써 모든 독립요인의 효과를 참가자내 설계에서 검증하는 방안도 검토할 수 있을 것이다.¹⁾

References

- Baird, B., Smallwood, J., Gorgolewski, K. J., & Margulies, D. S. (2013). Medial and lateral networks in anterior prefrontal cortex support metacognitive ability for memory and perception. *The Journal of Neuroscience*, 33(42), 16657~16665.
- Brainard, D. H. (1997). The psychophysics toolbox. *Spatial Vision*, 10(4), 433~436.
- Brown, R., Lau, H., & LeDoux, J. E. (2019). Understanding the higher-order approach to consciousness. *Trends in Cognitive Sciences*, 23(9), 754~768.
- Clarke, F. R., Birdsall, T. G., & Tanner, W. P. (1959). Two types of ROC curves and definitions of parameters. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 31(5), 629~630.
- Dehaene, S., Changeux, J.-P., Naccache, L., Sackur, J., & Sergent, C. (2006). Conscious, preconscious, and subliminal processing: a testable taxonomy. *Trends in Cognitive Sciences*, 10(5), 204~211.
- Del Cul, A., Dehaene, S., Reyes, P., Bravo, E., & Slachevsky, A. (2009). Causal role of prefrontal cortex in the threshold for access to consciousness. *Brain*, 132(Pt 9), 2531~2540.
- Fleming, S. M., Weil, R. S., Nagy, Z., Dolan, R. J., & Rees, G. (2010). Relating introspective accuracy to individual differences in brain structure. *Science*, 329(5998), 1541~1543.
- Frith, C. D. (2012). The role of metacognition in human social interactions. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 367(1599), 2213~2223.
- Fritsch, B., Reis, J., Martinowich, K., Schambra, H. M., Ji, Y., Cohen, L. G., & Lu, B. (2010). Direct current stimulation promotes BDNF-dependent synaptic plasticity: potential implications for motor learning. *Neuron*, 66(2), 198~204.
- Hamm, J. A., Renard, S. B., Fogley, R. L., Leonhardt, B. L., Dimaggio, G., Buck, K. D., & Lysaker, P. H. (2012). Metacognition and social cognition in schizophrenia: stability and relationship to concurrent and prospective symptom assessments. *Journal of Clinical Psychology*, 68(12), 1303~1312.
- Jacobson, L., Koslowsky, M., & Lavidor, M. (2012). tDCS polarity effects in motor and cognitive domains: a meta-analytical review. *Experimental Brain Research*, 216(1), 1~10.
- Lau, H. C. (2008). A higher order Bayesian decision theory of consciousness. *Progress in Brain Research*, 168, 35~48.
- Lau, H. C., & Passingham, R. (2006). Relative blindsight in normal observers and the neural correlate of visual consciousness. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(49), 18763~18768.
- Lau, H. C., & Rosenthal, D. (2011). Empirical support for higher-order theories of conscious awareness. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(8), 365~373.
- Levitt, H. (1971). Transformed up-down methods in psychoacoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 49(2B), 467~477.
- Macmillan, N. A., & Creelman, C. D. (2004). *Detection Theory: A User's Guide* (2nd ed.). Psychology Press.
- Maniscalco, B., & Lau, H. C. (2012). A signal detection theoretic approach for estimating metacognitive sensitivity from confidence ratings. *Consciousness and Cognition*, 21(1), 76~100.

1) 본 논문의 원자료와 분석 코드를 Github 사이트 (https://cogneuro.github.io/meta_tDCS)에 공개하였다.

- 21(1), 422-430.
- Metcalf, J., & Shimamura, A. P. (1994). *Metacognition: Knowing about Knowing*. MIT Press.
- Nelson, T. O. (1984). A comparison of current measures of the accuracy of feeling-of-knowing predictions. *Psychological Bulletin*, 95(1), 109-133.
- Okamoto, M., Dan, H., Sakamoto, K., Takeo, K., Shimizu, K., Kohno, S., Oda, I., Isobe, S., Suzuki, T., Kohyama, K., & Dan, I. (2004). Three-dimensional probabilistic anatomical cranio-cerebral correlation via the international 10-20 system oriented for transcranial functional brain mapping. *NeuroImage*, 21(1), 99-111.
- Passingham, R. E. (1993). *The frontal lobes and voluntary action* (Vol. 299). Oxford University Press
- Prins, N., & Kingdom, F. A. A. (2018). Applying the model-comparison approach to test specific research hypotheses in psychophysical research using the Palamedes toolbox. *Frontiers in Psychology*, 9, 1250.
- Rounis, E., Maniscalco, B., Rothwell, J. C., Passingham, R. E., & Lau, H. C. (2010). Theta-burst transcranial magnetic stimulation to the prefrontal cortex impairs metacognitive visual awareness. *Cognitive Neuroscience*, 1(3), 165-175.
- Shea, N., & Frith, C. D. (2019). The global workspace needs metacognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 23(7), 560-571.
- Shekhar, M., & Rahnev, D. (2018). Distinguishing the roles of dorsolateral and anterior PFC in visual metacognition. *The Journal of Neuroscience*, 38(22), 5078-5087.
- Shibata, K., Chang, L.-H., Kim, D., Nanez, J. E., Sr, Kamitani, Y., Watanabe, T., & Sasaki, Y. (2012). Decoding reveals plasticity in V3A as a result of motion perceptual learning. *PloS One*, 7(8), e44003.
- Shimamura, A. P. (2000). Toward a cognitive neuroscience of metacognition. *Consciousness and Cognition*, 9(2 Pt 1), 313-323.

전전두 경두개 직류 자극에 의한 시각적 메타인지 강화

권다솜¹, 홍민석¹, 엄소용², 이도준¹

¹연세대학교 심리학과, ²연세대학교 의과대학 뇌전증연구소

전전두피질(prefrontal cortex; PFC)에 대한 경두개 직류 자극(transcranial direct current stimulation; tDCS)이 시각 판단과 메타인지에 미치는 영향을 검증하기 위해 자극집단과 비자극집단을 무작위 배정한 이중맹검 시험(randomized, sham - controlled, double - blind trial)을 수행하였다. 건강한 성인 참가자의 좌반구 PFC를 20분간 양극의 전류로 자극하고, 자극 전후에 점 운동 자극에 대한 시각판단 반응과 확신도를 측정하였다. 두 집단을 참가자간 요인으로 하고 두 검사 시점을 참가자내 요인으로 하는 실험설계에서 신호탐지이론을 적용한 결과, 메타인지 효율성(메타비율, $M_{ratio} = meta - d'/d'$)이 자극 집단에서만 증가하였다. 시각판단의 정확도와 과제 난이도, 확신도 평정값은 집단이나 검사 시점의 영향을 받지 않았다. 이러한 결과는 PFC에 대한 tDCS가 시각판단 수행이나 확신도 반응 편향에 영향을 끼치지 않고 메타인지 수행만 선택적으로 향상시켰음을 의미한다. 본 연구는 메타인지 향상을 위한 훈련과 재활 도구로서 tDCS의 유용성에 대한 경험적 증거를 제공한다.

주제어: 메타인지, 전전두피질, 경두개 직류 자극, 시의식