

# A Case Study on the Effectiveness of tDCS to Reduce Cyber-Sickness in Subjects with Dizziness

Chang Ju Kim<sup>1</sup>, Yoon Tae Hwang<sup>2</sup>, Yu Min Ko<sup>2</sup>, Seong Ho Yun<sup>3</sup>, Sang Seok Yeo<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Department of Physical Therapy, College of Health Science, Cheongju University, Cheongju, Republic of Korea, <sup>2</sup>Department of Physical Therapy, Gangneung Yeongdong University, Gangneung, Republic of Korea, <sup>3</sup>Department of Health, Graduate School, Dankook University, Cheonan, Republic of Korea, <sup>4</sup>Department of Physical Therapy, College of Health Sciences, Dankook University, Cheonan, Republic of Korea

**Purpose:** Cybersickness is a type of motion sickness induced by virtual reality (VR) or augmented reality (AR) environments that presents symptoms including nausea, dizziness, and headaches. This study aimed to investigate how cathodal transcranial direct current stimulation (tDCS) alleviates motion sickness symptoms and modulates brain activity in individuals experiencing cybersickness after exposure to a VR environment.

**Methods:** This study was performed on two groups of healthy adults with cybersickness symptoms. Subjects were randomly assigned to receive either cathodal tDCS intervention or sham tDCS intervention. Brain activity during VR stimulation was measured by 38-channel functional near-infrared spectroscopy (fNIRS). tDCS was administered to the right temporoparietal junction (TPJ) for 20 minutes at an intensity of 2mA, and the severity of cybersickness was assessed pre- and post-intervention using a simulator sickness questionnaire (SSQ).

**Result:** Following the experiment, cybersickness symptoms in subjects who received cathodal tDCS intervention were reduced based on SSQ scores, whereas those who received sham tDCS showed no significant change. fNIRS analysis revealed that tDCS significantly diminished cortical activity in subjects with high activity in temporal and parietal lobes, whereas high cortical activity was maintained in these regions after intervention in subjects who received sham tDCS.

**Conclusion:** These findings suggest that cathodal tDCS applied to the right TPJ region in young adults experiencing cybersickness effectively reduces motion sickness induced by VR environments.

**Keywords:** Cybersickness, Virtual reality, Transcranial direct current stimulation, Functional near-infrared spectroscopy

## 서론

멀미는 자동차, 비행기, 보트 등의 환경에서 이동할 때 생기는 메스꺼움, 구토, 어지러움, 땀 흘림 등의 증상을 특징으로 한다.<sup>1,2</sup> 멀미의 발생 원인은 안뜰감각, 시각, 고유수용성 감각의 입력 사이에 충돌로 인해 발생하는 것으로 알려져 있다.<sup>1,3</sup> 이러한 증상을 감각 충돌이론으로 설명하며, 가장 흔한 경우는 시각 입력과 몸의 움직임에 대한 안뜰감각 및 고유수용성 감각 사이의 충돌이다.<sup>4,6</sup> 감각 충돌에 따른 멀미의 증상은 개인별로 차이가 크며, 나이, 성별 등의 다양한 요인에 따라 달라질 수 있다. 기술의 발전과 더불어 감각 충돌에 의한 멀미의 양상도 다양화되고 있으며, 일반적인 자동차와 배멀미 이외에도 멀티미디어 작업환경에서 발생하는 멀미도 흔히 경험하게 된다.<sup>7,8</sup> 그중

사이버 멀미(cybersickness)는 게임이나 작업환경 등에서 가상현실(virtual reality, VR)이나 증강현실(augmented reality)과 같은 자극에 의해 발생하는 멀미의 일종이다.<sup>9</sup> 사이버 멀미의 증상은 일반적인 멀미와 유사하며 주로 메스꺼움, 어지러움, 두통 등의 증상을 보인다.<sup>7,8</sup>

사이버 멀미의 원인 역시 가상현실 공간에서 발생하는 감각 충돌 양상에 의해서 발생하는 것으로 알려져 있다.<sup>5</sup> 특히 Head Mounted Display (HMD)와 같은 몰입형 가상현실 상황에서 VR장비에서 제공되는 시각정보와 실제 신체의 움직임 사이에 불일치가 크게 발생하게 된다.<sup>10,11</sup> 사이버 멀미는 몸 감각과 안뜰 감각의 중추가 되는 마루엽과 관자엽에서 활성화 변화와 높은 연관성이 있을 것으로 생각된다.<sup>12</sup> VR장비에서 발생하는 응답시간 지연 및 부자연스러운 시각적 신호 등이 뇌에서 정보를 처리하는데 불편함을 야기시킬 수 있다. 사

Received February 8, 2024 Revised February 14, 2024

Accepted February 27, 2024

Corresponding author Sang-Seok Yeo

E-mail yeopt@dankook.ac.kr

Copyright ©2024 The Korean Society of Physical Therapy

This is an Open Access article distribute under the terms of the Creative Commons Attribution Non-commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이머 멀미의 감소를 위해서 기술적인 부분의 노력에는 가상현실 환경에서 제공되는 시각 정보를 부드럽게 처리하고 갑작스러운 시야 전환 방지하고 자연스러운 시각 추적 기능을 적용할 수 있다.<sup>13</sup> 또한 사이버 멀미의 경우 개인에 따라 다양하게 나타남으로, 가상현실 환경에 점진적인 노출을 만들어주어 멀미를 감소시킬 수도 있다.<sup>11</sup> 그 외에 가상현실에 제공되는 시각 정보에 맞춰 대상자에게 물리적인 움직임 및 감각 정보를 제공해주는 시스템의 적용을 통해 감각 충돌 양상을 최소화할 수 있는 기술도 개발되고 있다.<sup>10,14</sup>

경두개 직류자극법(Transcranial Direct Current Stimulation, tDCS)은 전극을 사용하여 두피에 직접 낮은 전류를 인가하는 비침습적 신경 조절 기술이며 이를 통해 대뇌결질의 신경 활동을 조절하는 데 사용된다.<sup>15</sup> tDCS는 두피에 배치된 전극을 통해 1-2mA 수준의 전류로 자극함으로써 신경세포의 안정성 막 전위를 조절할 수 있는 것으로 알려져 있다.<sup>16</sup> 결과적으로 신경세포의 흥분성 변화를 유도하게 되며 뇌의 활성도를 높이거나 낮출 수 있게 된다.<sup>16</sup> tDCS에 사용되는 전극의 배치는 목표가 되는 신경 회로와 그와 관련된 영역을 중심으로 이루어지며, 전극의 극성 효과에 따라 상이한 효과를 유도할 수 있다.<sup>17</sup> 배치된 전극에서 양극성 자극(anodal stimulation)은 일반적으로 신경의 흥분성을 증가시키는 것으로 알려져 있으며, 음극성 자극(cathodal stimulation)은 신경의 흥분성을 감소시키는 것으로 알려져 있다.<sup>17</sup> 전극의 부착 위치 및 자극 방법에 따라 다양한 증상에 tDCS를 적용할 수 있으며, 대표적으로 우울증 및 조현병과 같은 정신질환의 치료와 더불어 인지, 운동, 통증 조절에도 적용할 수 있다.<sup>15,17</sup> 하지만, tDCS의 효과는 모든 뇌 질환에 적용할 수 있는 것은 아니며, 정신질환을 포함한 임상적 효과에 대한 연구는 여전히 진행 중에 있다.

따라서 본 연구의 목적은 사이버 멀미가 심한 사람을 대상으로 하여 cathodal tDCS의 적용이 가상현실 환경에서 멀미 증상의 개선 및 뇌 활성도 변화의 양상에 대하여 연구하고자 한다.

## 연구 방법

### 1. 연구대상

본 연구는 사이버 멀미 증상을 경험한 건강한 20대 성인 2명을 대상으로 실시되었다. 대상자 선정기준은 다음과 같다. 1) 근골격계, 신경계 질환이 없는 자, 2) 우세손이 오른손인 자, 3) 최근 6개월 가상현실에 노출된 경험이 없는 자. 모든 대상자는 연구의 목적 및 실험 방법에 대한 설명을 듣고, 연구 참여 동의서를 작성하였다. 대상자들은 tDCS 자극 유형에 따라 cathodal tDCS를 적용한 대상자 1명(성별: 남성, 연령: 21세)과 sham tDCS를 적용한 대상자 1명으로 배정되었다.

### 2. 측정도구 및 방법

#### 1) 가상현실 멀미 설문지(simulator sickness questionnaire, SSQ)

본 연구는 사이버 멀미 증상을 평가하기 위해 가상현실 멀미 설문지(Simulator Sickness Questionnaire, SSQ)를 사용하였다. SSQ는 어지러움, 두통, 눈의 피로 등 사이버 멀미 증상과 관련된 16개의 항목으로 구성되어 있으며, 각각의 증상에 대한 정도를 4점 Likert 척도(0=없음, 1=경증, 2=중간, 3=심각)를 사용하여 평가한다. 점수는 선행연구를 기반으로 전체 점수(total SSQ)와 하위항목인 메스꺼움(nausea), 안구운동장애(oculomotor distress), 방향감각상실(disorientation) 항목을 계산하였다.<sup>18</sup>

#### 2) 기능적 근적외선 분광기법(functional near infrared spectroscopy, fNIRS)

본 연구는 뇌활성도를 측정하기 위해 기능적 근적외선 분광기법 Nirxport 2 (Nirx Medical Technologies LLC, Berlin, Germany)를 사용하였다. 760nm과 850nm 파장의 광원(light source) 15개와 광검출기(detector) 13개는 10-20 international system에 따라 배치하여 38개의 채널을 구성하였으며, 표본추출률은 12.52Hz로 설정하였다. 관심영역(region of interest, ROI)은 전정·고유수용성 감각처리 및 다중감각통합과 관련이 있는 관자마루접합(temporoparietal junction, TPJ)에 해당되는 위관자이랑(superior temporal gyrus, STG), 중간관자이랑(middle temporal gyrus, MTG), 위마루엽(superior parietal lobule, SPL), 모서리위이랑(supramarginal gyrus, SMG), 모이랑(angular gyrus, AG)으로 설정하였다.<sup>19</sup>

본 연구에서 fNIRS 신호는 nirxLab ver 2019.04 (NIRx Medical Technologies LLC, Berlin, Germany)를 사용하여 분석되었다. 각 채널의 신호 대 잡음 품질은 두 파장의 원시 신호의 상대적 변동 계수(relative coefficient of variation, CV)를 사용하여 평가되었으며, 15% 이하를 적정 수준으로 설정하였다. 각 신호의 불연속성(discontinuities)과 스파이크 아티팩트(spike artifacts)는 선행연구를 기반으로 처리되었으며,<sup>20</sup> 0.001-0.20Hz 대역 통과 필터(band-pass filter)를 적용하여 심장박동, 호흡에 대한 영향을 제거하였다. 수정된 Beer-Lambert 법칙을 사용하여 산화헤모글로빈(HbO), 탈산화헤모글로빈(HbR), 전체헤모글로빈(HbT)의 변화량을 계산하였다.<sup>21</sup> 전처리된 데이터는 Statistical Parameter Mapping NIRS-SPM과 일반 선형화 모델(general linear model, GLM)을 이용하여 HbO와 HbT 기반 뇌활성도를 분석하였다.

#### 3) 경두개 직류 자극(transcranial direct current stimulator, tDCS)

본 연구는 ActiveDoes (ActivaTek, USA) tDCS 장비와 5×5cm (25cm<sup>2</sup>) 크기의 스폰지 전극을 사용하여 자극을 제공하였다. 전극은 international 10-20 system을 기반으로 부착되었으며, 생리식염수에 적신 후

에 헤어 밴드를 이용하여 고정하였다. Cathodal tDCS 대상자의 경우 음극전극(cathodal electrode)은 오른쪽 TPJ 해당되는 CP6에 부착하였으며<sup>22,23</sup>, 양극전극(anodal electrode)은 Cz에 배치하였다. 자극의 강도는 2mA, 적용시간은 20분으로 설정하였다. Sham tDCS 대상자의 경우 cathodal tDCS 대상자와 동일한 위치에 전극을 부착하였으며, 10초간 0.1mA로 자극 후 자극 강도를 감소시켜 대상자가 지속적으로 자극을 받고 있는 것처럼 인지하도록 실시하였다.

3. 연구절차

본 연구는 tDCS가 사이버 멀미 증상과 뇌활성도에 미치는 영향에 대해 조사하기 위해 사전 사후 검사 설계를 사용하였으며 대상자들은 tDCS 적용 전후에 가상현실환경에 노출되었다. 대상자들은 HMD Oculus Quest 2 (Meta, USA)와 fNIRS 장비를 착용 후 사전검사를 진행하였다. 본 연구는 fNIRS 측정을 위해 총 3개의 블록으로 구성된 블록 디자인을 사용하였으며, 각 블록은 30초 휴식 구간(rest phase), 120초 과제 구간(task phase), 30초 휴식 구간(rest phase) 순으로 설계되었다. 휴식 구간의 경우 대상자들은 30초 동안 눈을 감은 상태를 유지하였으며, 과제 구간의 경우 120초 동안 가상현실 롤러코스터 영상을 시청하였다. fNIRS 측정 후 대상자들은 사이버 멀미 증상 정도를 SSQ를 통해 평가하였다. 이후 Cathodal tDCS 대상자는 오른쪽 TPJ에 cathodal tDCS를 20분간 제공받았으며, Sham tDCS 대상자는 sham tDCS를 20분간 제공받았다. tDCS 적용 후 대상자들은 사후검사를

진행하였으며, fNIRS와 사이버 멀미 증상은 사전 검사와 동일한 방법으로 측정되었다.

결 과

1. 사이버 멀미 증상

Cathodal tDCS 대상자의 경우 tDCS 중재 후 전체 SSQ, 메스꺼움, 안구운동장애, 방향감각상실 점수가 감소하였으며, Sham tDCS 대상자의 경우 전체 SSQ, 안구운동장애, 방향감각상실 점수가 감소하였다. 변화량 분석 결과, cathodal tDCS 대상자가 sham tDCS 대상자에 비해 tDCS 적용 후 전체 SSQ, 메스꺼움, 안구운동장애, 방향감각상실 점수가 크게 감소하였다(Table 1).

2. 뇌활성도

HbO 분석 결과, cathodal tDCS 대상자는 사전검사에서 양측 MTG, SMG, AG영역과 우측 STG, SPL영역이 활성화되었으며, 사후검사에서 좌측 MTG영역과 우측 AG영역이 활성화되었다. Sham tDCS 대상자의 경우 사전검사에서 양측 SPL영역과 좌측 STG, SMG, AG영역이 활

Table 1. Comparison of the simulator sickness questionnaire scores between cathodal and sham groups (Unit: scores)

	Cathodal tDCS			Sham tDCS		
	Pre	Post	Difference	Pre	Post	Difference
Total SSQ	130.90	86.02	-44.88	142.12	134.64	-7.48
Nausea	66.78	47.70	-19.09	95.40	104.94	9.54
Oculomotor	106.12	75.80	-30.32	113.70	98.54	-15.16
Disorientation	194.88	111.36	-83.52	180.96	167.04	-13.92

tDCS: Transcranial direct current stimulation, SSQ: Simulator sickness questionnaire.

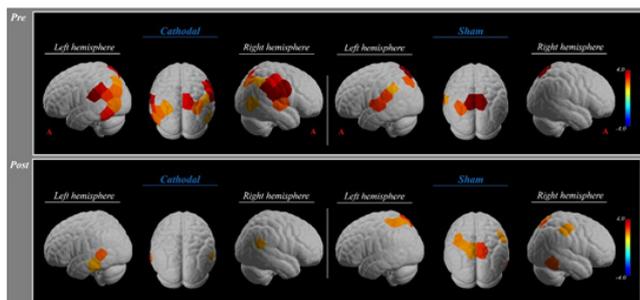


Figure 1. t-statistic maps of oxyhemoglobin values during cybersickness using NIRS Lab software

Table 2. The significant channels of HbO during rollercoaster virtual reality

		Cathodal tDCS		Sham tDCS	
		Pre tDCS	Post tDCS	Pre tDCS	Post tDCS
Lt	STG			21 (2.63)	
	MTG	31 (2.11)	4 (2.27)		
		32 (2.96)	22 (1.72)		
	SPL			35 (3.99)	9 (1.99)
					10 (1.86)
					11 (1.76)
Rt	SMG	2 (3.89)		2 (2.60)	
	AG	1 (3.48)		1 (1.67)	
		3 (2.72)		16 (2.27)	
				16 (1.86)	
				17 (2.25)	
				24 (2.41)	
Rt	STG	24 (2.41)			
	MTG	33 (1.75)		34 (2.48)	
		36 (3.14)		36 (4.46)	36 (2.66)
	SMG	6 (6.40)		29 (1.87)	
		29 (3.06)			
		30 (5.63)			
AG	5 (5.09)	7 (1.71)			
	18 (1.73)				
	19 (2.15)				

Values represent significant channel (t-value). tDCS: Transcranial direct current stimulation, Lt: left, Rt: right, STG: superior temporal gyrus, MTG: middle temporal gyrus, SPL: superior parietal lobule, SMG: supramarginal gyrus, AG: angular gyrus.

**Table 3.** The significant channels of HbT during rollercoaster virtual reality

		Cathodal tDCS		Sham tDCS		
		Pre tDCS	Post tDCS	Pre tDCS	Post tDCS	
Lt	STG			26 (1.73)		
	MTG				23 (2.85)	
	SPL			35 (4.30)	9 (2.24)	
					10 (2.41)	
					35 (2.56)	
SMG			2 (2.19)			
AG		1 (2.13)		16 (2.13)		
		16 (2.30)				
Rt	MTG				26 (2.92)	
					34 (3.38)	
	SPL	36 (2.28)		36 (4.55)	36 (3.43)	
	SMG		6 (4.03)		6 (1.71)	
			29 (3.02)			
			30 (4.42)			
	AG		5 (5.14)		5 (1.96)	
		18 (2.22)				
		19 (2.16)				

Values represent significant channel (t-value), tDCS: Transcranial direct current stimulation, Lt: left, Rt: right, STG: superior temporal gyrus, MTG: middle temporal gyrus, SPL: superior parietal lobule, SMG: supramarginal gyrus, AG: angular gyrus.

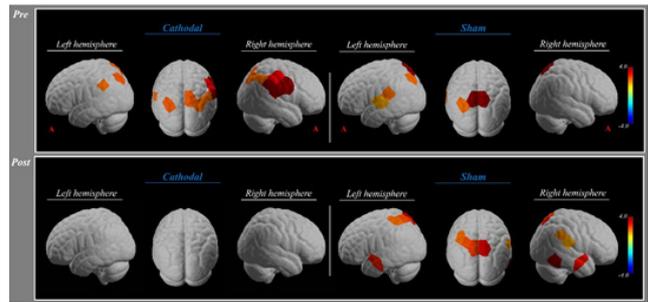
성화되었으며, 사후검사에서 양측 SPL영역과 우측 SMG, MTG영역이 활성화되었다(Table 2, Figure 1).

HbT 분석 결과, cathodal tDCS 대상자는 사전검사에서 양측 AG영역과 우측 SPL, SMG영역이 활성화되었으며, 사후검사에서 활성화된 영역이 없었다. Sham tDCS 대상자는 사전검사에서 양측 SPL영역과 좌측 STG, SMG, AG영역이 활성화되었으며, 사후검사에서 양측 MTG, SPL영역과 우측 SMG, AG영역이 활성화되었다(Table 3, Figure 2).

### 고찰

본 연구는 tDCS가 사이버 멀미 및 뇌활성도 변화에 미치는 영향에 대해 조사하기 위해 실시되었다. 본 연구의 주요한 결과는 다음과 같다. 1) Cathodal tDCS 대상자가 sham 대상자에 비해 tDCS 적용 후 사이버 멀미 증상이 감소하였다. 2) Cathodal tDCS 대상자와 sham 대상자 모두 tDCS 적용 후 TMJ 영역의 뇌활성도가 감소하는 패턴을 보이지만, cathodal tDCS 대상자의 뇌활성도가 sham tDCS 대상자에 비해 크게 감소하였다.

사이버 멀미 평가를 위한 SSQ 결과 요약하면 cathodal tDCS 대상자는 전체 SSQ결과 값에서 34% 감소하였고, sham 대상자는 5% 정도 감소하였다. 각 세부 결과에서 cathodal tDCS 대상자는 방향감각 상실 점수가 74% 감소하였고, 안구운동 점수 41% 감소하였고, 메스꺼움



**Figure 2.** t-statistic maps of total hemoglobin values during cybersickness using NIRSLab software

점수가 40% 감소하였다. 반면, sham 대상자의 경우 방향감각 상실에서 7%, 안구운동에서 15% 감소하였고, 메스꺼움 점수에서는 9% 증가한 결과를 보였다. 이전 여러 연구들에서 tDCS 적용에 따른 어지럼증이나 멀미 증상의 개선 효과들을 보고하였다. Takeuchi 등<sup>22</sup>의 연구에서 20명의 젊은 성인을 대상으로 하여 오른쪽 TPJ에 anodal, cathodal, sham tDCS를 적용하였을 때 사이버 멀미 완화와 자세 불안정성의 개선 양상을 연구하였다. 연구결과 오른쪽 TPJ 영역에 1.5mA 강도로 15분 동안 anodal tDCS를 적용한 결과 자세 안정성 변화(COP 이동거리)가 VR 적용 전과 비교하여 유의한 차이가 없었고 SSQ 결과에서 방향감각 상실은 cathodal과 sham tDCS와 비교하여 유의하게 적은 증가양상을 보였다.<sup>22</sup> 반면, cathodal과 sham tDCS를 적용한 결과 기준선에 비해 VR 적용 후 자세 불안정성과 SSQ점수가 유의하게 증가하였다.<sup>22</sup> 결과적으로 오른쪽 TPJ 영역에 anodal tDCS는 대뇌결질의 흥분성 변화를 통해 VR 자극 이후에도 자세 안정성이 유지되고 공간 지각 능력의 영향이 상대적으로 적었던 반면, cathodal과 sham tDCS는 신경학적 변화를 유도하지 못한 것으로 사료된다. tDCS의 효과 연구와 관련해서 사이버 멀미뿐만 아니라 만성 어지럼증에 대한 효과 연구도 보고되고 있다. Koganemaru 등<sup>24</sup>의 연구에서 15명의 만성 어지럼증 환자를 대상으로 오른쪽 꼭지돌기(mastoid)에 2mA 강도로 anodal tDCS를 20분간 적용한 결과 sham tDCS 그룹(15명)과 비교하여 유의한 어지럼증 개선 효과를 보고하였다. 꼭지돌기에 부착한 전극은 소뇌 결질 영역에 해당하며 anodal tDCS 자극이 소뇌결질의 흥분성 변화를 유도하고 결과적으로 어지럼증이 개선된 것으로 생각된다.

fNIRS 분석을 통한 대뇌결질의 활성도 변화를 비교한 결과 cathodal tDCS 대상자는 적용 전 가상현실 자극에 의해 우측 STG, SPL과 양측 MTG, SMG, AG영역에서 높은 활성도를 보였다. 반면 cathodal tDCS의 적용 후에 우측 AG와 좌측 MTG영역에서만 유의한 활성도가 관찰되었다. Sham 대상자의 경우 sham tDCS 적용 전 가상현실 자극에 의해 좌측 STG, SMG, AG와 양측 SPL영역에서 높은 활성도를 보였고, sham tDCS 적용 후 우측 MTG, SMG와 양측 SPL에서 높은 활성

도가 유지되는 것으로 관찰되었다. 결과적으로 사이버 멀미 증상이 나타날 경우 대뇌겉질의 부위의 높은 활성도가 측정된 반면, cathodal tDCS 적용 후 사이버 멀미 증상의 개선과 함께 대뇌겉질 활성도가 감소한 것으로 관찰되었다. 이전 연구들에서 어지럼증이나 멀미 등의 증상이 대뇌겉질의 흥분성 변화와 관련된 것으로 보고하고 있다. Nguyen 등<sup>25</sup>의 연구에서 fNIRS 분석법을 사용하여 시각 및 안뜰 감각 자극에 의한 감각 충돌 발생 시 대뇌의 혈액학적 반응을 연구하였다. 대뇌겉질의 활성도 측정을 위해 TPJ에 전극을 부착하였고, 안뜰 감각 자극을 위한 회전 의자와 시각 자극을 위한 화면에 제시되는 흰 선을 움직임을 사용하였다. 연구결과 회전 의자와 시각 자극의 불일치가 발생하는 시각 자극 부조화 조건에서 양측 대뇌겉질의 TPJ 영역에서 유의한 활성도가 관찰되었고, 시각 자극 조화 조건에서는 상대적으로 낮은 수준의 활성도가 관찰되었다. 이는 감각 충돌 조건에서 TPJ 영역의 높은 활성도가 발생한 것으로 사료되며 이로 인해 멀미나 어지럼증 등의 증상이 나타난 것으로 보고하였다. 본 연구결과 역시 VR 자극에 의한 사이버 멀미 발생 시 주로 마루업과 관자엽 등의 영역에서 높은 활성도가 관찰되었고, cathodal tDCS 적용 이후 멀미 증상이 개선되면서 낮은 수준의 활성도를 유지하는 것으로 나타났다. 결과적으로 감각 충돌이 발생할 경우 신체 및 공간 지각 관련된 영역의 높은 활성도가 발생하며 이는 멀미와 어지럼증을 유발하는 것으로 사료된다. 또한 cathodal tDCS 적용이 신체 및 공간 지각 관련 대뇌겉질의 활성도 변화를 유도하여 사이버 멀미의 감소 효과를 보인 것을 판단된다.

본 연구 결과 사이버 멀미가 증상이 있는 젊은 성인 대상으로 오른쪽 TPJ 영역에 cathodal tDCS의 적용이 VR 경험이 발생하는 멀미 증상의 감소와 대뇌겉질 활성도의 감소 효과가 있었다. 반면, 오른쪽 TPJ 영역에 sham tDCS를 적용한 대상자의 경우 가상현실 경험 후 뚜렷한 멀미 증상의 개선이 없었으며, 대뇌 겉질 활성도의 차이도 크게 나타나지 않았다. 이전 연구들을 종합하여 볼 때 어지러움, 메스꺼움 등의 멀미 증상은 감각 충돌에 의한 대뇌겉질의 과활성화와 관련된 것으로 볼 수 있으며, cathodal tDCS의 적용을 통해 대뇌겉질의 흥분성을 감소하였고 그에 따라 감각 충돌에 따른 멀미 증상이 완화되었을 것으로 사료된다. 따라서, 적절한 강도와 시간의 tDCS 적용이 다양한 질환에 의한 어지럼증이나 VR 환경에서 발생하는 사이버 멀미의 중재 방법으로 사용될 수 있을 것이다. 본 연구의 제한점은 다음과 같다. 첫째, 본 연구는 각 조건에 1명의 대상으로 한 사례 연구로 연구결과를 일반화할 수 없다. 둘째, 사이버 멀미의 경우 개인에 따라 나타내는 증상의 편차가 심하여 본 연구의 결과가 tDCS의 적용에 의한 것이 명확한 인과 관계를 밝히기 어렵다. 셋째, 본 연구에서 적용한 tDCS의 적용 프로토콜을 다른 연구에 적용하는 것이 유의할지 알 수 없고 임상적 적용 가능성에 제한이 있을 수 있다. 따라서 향후 연

구에서는 보다 많은 대상자와 다양한 연령을 대상으로 하여 사이버 멀미에 따른 뇌 활성도 변화 양상과 tDCS 적용에 따른 뇌 활성도의 감소 혹은 증가 양상을 확인할 필요가 있을 것이다.

## ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 한국정부가 지원하는 한국연구재단의 연구비 지원을 받은 연구임(2021R1G1A1095407).

## REFERENCE

1. Keshavarz B, Golding JF. Motion sickness: current concepts and management. *Curr Opin Neurol*. 2022;35(1):107-12.
2. Mittelstaedt JM. Individual predictors of the susceptibility for motion-related sickness: a systematic review. *J Vestib Research*. 2020;30(3):165-93.
3. Fabre M, Beullier L, Sutter C et al. Cortical facilitation of somatosensory inputs using gravity-related tactile information in humans with vestibular hypofunction. *J Neurophysiol*. 2023;130(1):155-67.
4. Wibble T, Pansell T. Clinical characteristics of visual motion hypersensitivity: a systematic review. *Exp Brain Res*. 2023;241:1-13.
5. Buchheit B, Schneider E, Alayan M et al. Motion sickness related route profiling for evaluation of the sensory conflict in real-driving studies. In 2022 44th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC). 2022:816-9.
6. Chung W, Barnett-Cowan M. Influence of sensory conflict on perceived timing of passive rotation in virtual reality. *Multisensory Res*. 2022;35(5):367-89.
7. Drazich BF, McPherson R, Gorman EF et al. In too deep? A systematic literature review of fully-immersive virtual reality and cybersickness among older adults. *J Am Geriatr Soc*. 2023;71(12):3906-15.
8. Weech S, Kenny S, Barnett-Cowan M. Presence and cybersickness in virtual reality are negatively related: a review. *Front Psychol*. 2019;10:158.
9. Lundin RM, Yeap Y, Menkes DB. Adverse effects of virtual and augmented reality interventions in psychiatry: systematic review. *JMIR Mental Health*. 2023;10:e43240.
10. Yeo SS, Kwon JW, Park SY. EEG-based analysis of various sensory stimulation effects to reduce visually induced motion sickness in virtual reality. *Sci Rep*. 2022;12(1):18043.
11. Ang S, Quarles J. Reduction of cybersickness in head mounted displays use: a systematic review and taxonomy of current strategies. *Front Virtual Real*. 2023;4:1027552.
12. Chang E, Billinghamurst M, Yoo B. Brain activity during cybersickness: a scoping review. *Virtual Real*. 2023;27:2073-97.
13. Park WD, Jang SW, Kim YH et al. A study on cyber sickness reduction by oculo-motor exercise performed immediately prior to viewing virtual reality (VR) content on head mounted display (HMD). *Vib Proced*. 2017;14:260-4.
14. Benelli A, Neri F, Cinti A et al. Frequency-dependent reduction of cybersickness in virtual reality by transcranial oscillatory stimulation of the

- vestibular cortex. *Neurotherapeutics*. 2023;20(6):1796-807.
15. Huang W, Wang H, Hu N et al. Efficacy of noninvasive brain stimulation in treating general psychopathology symptoms in schizophrenia: a meta-analysis. *J Integr Neurosci*. 2024;23(1):7.
  16. Bormann NL, Oesterle TS, Arndt S et al. Systematic review and meta-analysis: combining transcranial magnetic stimulation or direct current stimulation with pharmacotherapy for treatment of substance use disorders. *Am J Addict*. 2024.
  17. Halakoo S, Ehsani F, Hosnian M et al. The comparative effects of anodal and cathodal trans-cranial direct current stimulation on balance and posture: a systematic review of literature and meta-analysis. *J Clin Neurosci*. 2023;107:68-76.
  18. Kennedy RS, Lane NE, Berbaum KS et al. Simulator sickness questionnaire: an enhanced method for quantifying simulator sickness. *Int J Aviat Psychol*. 1993;3(3):203-20.
  19. Frank SM, Greenlee MW. The parieto-insular vestibular cortex in humans: more than a single area? *J neurophysiol*. 2018;120(3):1438-50.
  20. Zhang D, Zhou Y, Yuan J. Speech prosodies of different emotional categories activate different brain regions in adult cortex: an fNIRS study. *Scientific Reports*. 2018;8(1):218.
  21. Baker WB, Parthasarathy AB, Busch DR et al. Modified beer-lambert law for blood flow. *Biomed Opt Express*. 2014;5(11):4053-75.
  22. Takeuchi N, Mori T, Suzukamo Y et al. Modulation of excitability in the temporoparietal junction relieves virtual reality sickness. *Cyberpsychol Behav Soc Netw*. 2018;21(6):381-7.
  23. Kyriakareli A, Cousins S, Pettorossi VE et al. Effect of transcranial direct current stimulation on vestibular-ocular and vestibulo-perceptual thresholds. *Neuroreport*. 2013;24(14):808-12.
  24. Koganemaru S, Goto F, Arai M et al. Effects of vestibular rehabilitation combined with transcranial cerebellar direct current stimulation in patients with chronic dizziness: an exploratory study. *Brain Stimulation*. 2017;10(3):576-8.
  25. Nguyen NT, Takakura H, Nishijo H et al. Cerebral hemodynamic responses to the sensory conflict between visual and rotary vestibular stimuli: an analysis with a multichannel near-infrared spectroscopy (NIRS) system. *Front Hum Neurosci*. 2020;14:125.