



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)



VR환경을 이용한 상지 재활 치료에서 뉴로피드백의 종류에 따른 뇌파의 변화와 효과

석사학위논문

# VR환경을 이용한 상지 재활 치료에서 뉴로피드백의 종류에 따른 뇌파의 변화와 효과

계명대학교 대학원  
의학과

임승의

임승의

지도교수 구정훈

2021년

8월

2021년 8월



VR환경을 이용한 상지 재활 치료에서  
뉴로피드백의 종류에 따른  
뇌파의 변화와 효과

지도교수 구 정 훈

이 논문을 석사학위 논문으로 제출함

2021년 8월

계명대학교 대학원  
의 학 과

임 승 의

# 임승의의 석사학위 논문을 인준함

주 심 박 회 준

부 심 구 정 훈

부 심 이 종 하

계 명 대 학 교 대 학 원

2 0 2 1 년 8 월

## 목 차

1. 서 론 .....	1
2. 재료 및 방법 .....	8
3. 성 적 .....	24
4. 고 찰 .....	28
5. 요 약 .....	29
참고문헌 .....	30
Abstract .....	38
국문초록 .....	40

## 표 목 차

<표 1> EEG Device DSI-24 Specifications .....	9
<표 2> 주관적 평가 항목 .....	14

## 그림 목차

<그림 1> 실험 패러다임 순서와 시간 .....	13
<그림 2> 뉴로 피드백을 결합한 가상 환경에서의 거울치료 시스템 .....	16
<그림 3> 가상 공을 따라가는 게임에서 뉴로 피드백 값에 따라 점수에 기여 되는 방법 .....	17
<그림 4> 실시간 데이터 흐름 및 통신 종류 .....	19
<그림 5> 그룹에 따른 뉴로 피드백 실시간 계산 방법 .....	20
<그림 6> 가상 손 동기화에 따른 가상 손 착각 의 정도를 측정 .....	22
<그림 7> 각 그룹에서 mu band power의 topo-map .....	25
<그림 8> 인지 기반 착각 척도 평가 결과 .....	27

# 1. 서론

## 1.1. 연구배경:

뇌졸중(Stroke)은 뇌혈관의 혈류 이상으로 국소적인 신경학적 결손을 이르며, 크게 여러 이유로 혈관이 막히는 뇌경색과 막혀있던 혈관의 파열로 출혈이 발생하는 뇌출혈로 분류된다(1). 뇌는 몸 전체 산소 소모량의 20%를 소모하는 중요한 기관 중 하나이므로 뇌혈관이 막히거나 출혈로 뇌세포의 손상이 기능적 장애로 이어진다(1, 2). 또한 심하면 사망으로 이어지는데 전체 사망률의 3위를 차지하고 있으며, 사망을 면하더라도 3개월 이상의 장기 입원 치료를 필요로 하는 비율이 20% 정도 되며 15%~30%는 영구적인 신체적 장애를 갖게 된다(3). 최근 기술의 발전으로 사망률은 꾸준히 감소하는 추세에 있지만, 영구적 장애를 극복하는 데에는 한계가 존재한다.

세계보건기구에 따르면 뇌졸중 환자의 85% 이상이 편마비 증상을 경험하며 그중에 69% 이상의 환자에서 상지 편마비 증상을 가진다. 편마비 환자는 마비 측 사지의 기능 회복을 중점으로 재활 치료와 약물치료를 병행하여야 하며, 초기 재활의 적극성에 따라 회복력이 결정되게 된다(4). 즉, 뇌졸중 이후 마비 환자를 대상으로 진행하는 재활 치료가 기능적 회복과 사회적 복귀에 매우 중요하다.



## 1.2. 배경 이론:

### 1.2.1. 편마비 환자의 재활치료:

편마비의 원인은 매우 다양하지만 대부분 뇌졸중으로 인한 뇌의 반구 손상이 가장 많다(5). 뇌졸중 환자의 회복은 기능적 회복과 신경학적 회복으로 크게 나눌 수 있다. 기능적 회복은 뇌의 신경이 손상된 상태로 재활 치료를 통하여 이동능력과 일상성 활동 기능 등을 향상하는 것을 의미한다. 반면에 신경학적 회복은 수술에 의해 국소적 부종 및 혈종의 개선 또는 뇌압의 정상화 등으로 손상 받은 신경을 회복하는 것을 말하며 뇌 영역의 재배치 등에 의한 뇌가소성이 원리에 기반한다(6). 신경학적 회복은 6개월에서 1년 내 회복하며 기능적 회복은 수년 까지 지속될 수 있다(7).

뇌졸중 발병 후 첫 주에 100명중 73명 ~ 88명 정도에서 편마비 증상이 관찰된다. 특히 신경학적 회복은 3개월 내로 가장 많이 일어나며 6개월까지는 천천히 느린 회복을 기대해야 하며, 1년이 지나면 그 이상 신경학적 회복은 어렵다고 볼 수 있다(8). 따라서 편마비 증상 후 초기 3개월이 재활 치료에서 가장 중요하며 이때 적극적인 참여가 절실히 필요하다. 하지만 단 15% 미만의 뇌졸중 환자들만 정상 상태로 회복된다고 보고하고 있다.

### 1.2.2. 재활에서 뇌신경 가소성:

뇌신경 가소성이란 뇌신경이 외부의 자극과 경험, 학습에 의해 구조적 기증적 변화를 일으키고 재조직화 되는 현상을 말한다(9). 뇌신경은 일생동안 끊임없이 변화하며, 새로운 운동이나 언어를 학습하는 유년기에 활동성이 최대를 보이며 성년기나 노년기 이후에 재조직화가 감소하여 더디게 일어나지만, 여전히 새로운 운동이나 언어를 습득할 수 있는 수준의 가소성을 일생동안 유지하고 있다(10).

뇌졸중후 신경학적 회복에서 뇌의 손상된 신경이 대체 혹은 우회경로를 찾아가는 적응기간 이후에 신경경로의 회복과정을 거쳐서 서서히 회복한다(10, 11). 많은 연구에서 손상 받지 않는 뇌의 영역이 손상된 영역의 기능을 이전받아 뇌신경의 재조직화가 이루어지는 기간은 손상 영역, 범위, 경과 시간에 따라서 영향을 받는 것으로 알려져 있다(12). 따라서 뇌졸중 후 손상된 신경계적인 기능 회복을 극대화하기 위한 가장 효과적인 운동 재활 방법을 찾기 위한 다양한 노력이 진행되어야 한다. 또한 가소성 원리에 비추보면 발병 이후 6개월 이후에 기능적 회복이 이루어지지 않는 만성 뇌졸중 환자는 재조직화의 가능성이 줄어든다고 연구되었다(13).

전통적인 운동 재활 프로그램들은 뇌졸중 이후 3개월 기간에 집중되어 있으며 이 시기 이후에 회복되지 않으면 환자들은 일상생활을 위해 정상 측 기능을 사용하는 행동이 일반적이다. 이러한 정상기능 의존은 뇌가소성의 효율성을 떨어트리며 오히려 회복을 방해할 수 있다. 따라서 다양한 형태의 양측성 재활 치료가 의미 있는 결과를 내고 있다(14).

앞서 말한 이유로 정통적인 재활치료에서 해결해야 할 문제점은 지속 가능한 재활훈련, 단순한 움직임들의 다양화, 양측 사지의 협업 가능한 훈련 기법들이 있으며, 재활 치료에서 나아가야 할 방향을 제시하고 있다.

### 1.3. 선행연구:

#### 1.3.1. 가상환경에서 거울 치료:

가상현실(Virtual reality, VR)은 컴퓨터가 생성한 세계에 둘러싸인 경험을 제공하여, 실제와 같은 가상의 사건이 동시에 발생할 수 있는 가상 환경에서 상호작용을 통해 실제로 있다고 느낄 수 있는 포괄적이고 광범위한 기술을 말한다(15). 그러므로 가상환경에서 참가자는 가상환경에 몰입할 수 있으며 가상의 물체와 자연스러운 상호작용을 할 수 있다(16). 이러한 특징 때문에 여러 질병 치료에 강력한 장점이 있다는 것이 입증됐다. VR로 만성 통증을 완화하였고(17, 18) 뇌졸중과 같은 뇌 질환 환자의 운동 회복에 효과가 있었으며(19, 20) 여러 임상 조건에서 긍정적인 결과를 보였다(21, 22). 특히 거울에 반사된 정상 사지의 움직임보고 마비측 사지에 투영하여 양측 사지가 움직이는 착각을 유발하는 거울치료에서 기존 알려진 치료 원리를 유지하면서 운동의 착시 효과를 높여 치료 개선에 성공하였다(23). 또한 가상환경에서 사용자는 실제 손의 운동을 가상 손의 실시간 움직임으로 보기 때문에 시각적 착각 효과를 유발하는 데에 효과적으로 사용될 수 있다(24). 운동 영역의 연습 유무에 따라 동일한 Mirror Visual Feedback(MVF)를 주었을 때 훈련된 손과 훈련되지 않은 손 모두 운동성능의 향상을 본 연구가 있다(25). 이는 MVF가 손상된 상지의 재활에 도움이 될 수 있음을 시사한다. 따라서, 시각적 착각을 사용한 거울 치료 재활의 효과는 이 효과를 바탕으로 연구되었다. 최근 임상 실험은 거울 치료가 뇌졸중 후 운동 회복에 긍정적 효과를 보여 주었다(19). 거울 치료는 다음과 같이 이루어지는데, 마비측 팔의 주변을 덮는 거울 상자가 있고 중앙 방향으로 거울을 상자에 부착하여 손상된 사지를 볼 수 없게 함과 동시에 손상되지 않은 사지를 거울에 반사되어 보도록 한다. 거울을 통해 양측 사지가 결손 없이 동시에 대칭적으로 움직이는 착각을 일으킨다(26). 이를 가상환

경에서 구현할 수 있는데, 가상 손의 움직임을 반대 측 실제 손의 움직임으로 조작하면 비 마비 측 사지를 사용자의 의지대로 움직이는 착각을 유발할 수 있다.

### 1.3.2. 뉴로 피드백과 재활 치료:

뇌졸중에 의한 편마비 환자 대상으로 진행되는 재활치료는 일반적으로 반복적인 운동을 실시한다. 전통적인 재활에서 의자에 앉았다 일어나기, 공을 이용한 팔 운동, 블록 위에서 균형을 잡는 운동 등이 있다. 재활에서는 환자가 과제에 몰입하는 것에 따라 회복을 촉진할 수 있지만 주어진 과제에 집중도와 무관하게 빠른 시간 안에 운동기능을 회복하는 것에 한계가 명확하다(27). 따라서 환자의 몰입을 유도하여 기능회복의 효율성을 향상시키는 뉴로 피드백의 접목이 활발히 연구되고 있다. 뉴로 피드백은 실시간으로 뇌파를 분석하여 환자에게 다양한 결과를 피드백 해주어 두뇌 활동을 바꾸는 도구로 사용된다(28). 실시간 피드백을 통해 뇌의 신경 재구성에 여러 자극을 주어 가속화 할 수 있다. 이러한 피드백에는 시각적, 청각적 또는 촉각적 유형으로 자극을 줄 수 있다(29, 30). 뉴로 피드백은 주의력 결핍 과장 행동 장애(Attention Deficit Hyperactivity Disorder, ADHD), 간질, 뇌졸중 등의 환자를 대상으로 치료에 사용되었다(31~41).

앞선 연구에서 일반 재활치료와 뉴로 피드백의 결합 유무에 따른 차이는 신경 가소성의 원리를 이유로 들 수 있는데 손상을 입은 신경을 보다 빠르게 회복할 수 있다고 알려져 있다. 기존 연구 중 뉴로 피드백으로 10분간 유도된 알파리듬이 10분 더 지속 하였을 때 뇌의 활성화가 더 높아진 것은, 뉴로 피드백으로 유도된 대뇌 피질의 활성화가 지속된다고 볼 수 있다. 따라서 신경 가소성으로 인한 지속적인 뉴로 피드백 촉진 효과가 환자의 운동 재활에 영향을 줄 수 있다는 것을 시사한다.

#### 1.4. 연구목적:

뇌졸중 이후 73% ~ 88%가 편마비 증상을 겪고 있으며 그중 17%는 기능적 회복을 하지 못하고 영구적인 장애를 얻게 된다. 뇌졸중 이후 초기 재활치료가 중요한 이유는 3개월 이전까지 손상된 뇌신경의 회복과 재구조화가 활발히 이루어지며 그 이후 6개월까지 더디게 회복한다. 따라서 적절한 재활 치료가 즉각적으로 이루어져야 하지만 전통적인 재활에는 한계가 존재한다. 지속적인 재활과, 단순 반복적인 재활을 넘어 다양한 활동의 재활, 양측성 재활치료로 초기 재활에 집중해야 한다. 양측성 활동이 가능한 재활 중 거울 치료가 있다. 거울 치료는 정상 사지를 거울에 투영하여 움직임을 관찰하는데 이때 투영된 위치가 마비 측 사지에 있어 움직이는 느낌을 받도록 하면 손상된 뇌 운동영역을 자극하여 재활에 도움을 주는 운동이다. 거울 치료는 실제 복잡한 운동이 불가능하여 단순 반복적인 재활로 이어진다. 하지만 가상환경에서 구현 하면 복잡한 활동이 가능하며 지속적인 재활과 양측성 재활 운동이 될 수 있다.

본 연구에서는 흥미를 유발하는 게임을 접목한 거울 치료를 가상환경에서 구현 하였으며 더 나아가 뇌가소성을 가속화하기 위한 뉴로 피드백을 추가하여 실제 뉴로 피드백의 효과를 정량적인 뇌파를 통하여 살펴보고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 재료:

#### 2.1.1. 실험환경:

본 연구는 집중을 방해할 수 있는 외부와의 소음과 독립된 장소에서 진행되었다. 장소 중앙에 사각 테이블과 의자를 두어 참가자가 앉아서 실험을 진행할 수 있도록 하였으며 실제 테이블의 크기와 위치가 동일하게 가상환경에도 테이블이 있도록 설정 하였다. VR환경은 본 실험을 위해 Unity 3D (version 2018.1.3.f) 프로그램을 사용하여 구현하였으며 실험 진행 버튼을 누르면 설정한 패러다임에 따라 정확한 시간에 작동하도록 구현하였다. VR 장비는 HTC사의 VIVE를 사용하였으며 VR을 구동할 컴퓨터로 Intel i5-9600K, NVIDIA GeForce GTX 2070Super를 사용하였다. VR장비와 동시 착용하여 사용할 뇌파장비는 Wearable Sensing사의 DSI-24 19채널, 16bit resolution 장비를 사용하였다. VR 장비 중 HMD의 머리 고정 밴드와 뇌파 기기 사이에 간섭을 최소화 하면서 동시 착용 가능하도록 HMD의 밴드 부분만 직접 제작하여 실험을 진행하였다. 뇌파장비는 블루투스 무선 통신을 통해 실시간으로 컴퓨터에 전송되며, Brain-Computer Interfaces(BIC) 프로그램 중 Open-Source Software인 OpenVibe를 사용하여 데이터를 처리 후 VR프로그램으로 전송하여 뉴로 피드백을 구현하였다.

표 1. EEG Device DSI-24 Specifications

항목	Value
Sensor Location	10-20 location
Ground Location	Fpz
Ref Location	Pz(default)
Anolog Resolution(uV)	0.317
Sampling rate(Hz)	300(default)
Headset Weight(g)	~600
Maximum Input Range pk-pk(mv)	10



### 2.1.2. 실험 참가자:

본 연구에 자발적 참가자 21명(여성 6명 남성 15명)으로 실험을 진행 하였으며 평균 나이 24.77세 표준편차 4.22로 질병이 없는 평범한 일반인으로 모집되었다. 참가자들에게 실험 패러다임을 충분히 이해시키고 기관윤리심의위원회의 동의서에 동의를 받은 후 실험을 진행하였다(IRB number : DSMC-2019-03-017-001). 또한 사전에 특별하게 정신에 이상이 있거나 커피 등의 향정신성 약물 또는 전날 과음을 한 참가자들은 제외되었다. 실험에 서로 다른 3가지 뉴로 피드백의 조건을 사용하기 때문에 참가 순서에 따라 순차적으로 3그룹으로 나누어 진행하였으며 두 그룹은 뉴로 피드백을 적용하고 나머지 한 그룹은 뉴로 피드백 없이 실험을 진행하였다. 그룹별 참가자의 나이와 성별에 따른 통계적인 특이성은 없었다(그룹1 여성3명 남성 4명 나이  $23.4 \pm 3.0$ , 그룹2 여성 2명 남성 5명 나이  $25.3 \pm 4.4$ , 그룹3 여성 1명 남성 6명 나이  $25.6 \pm 5.5$ ).

## 2.2. 연구 방법:

### 2.2.1. 실험 패러다임:

참가자에게 실험 설명과 동의서를 획득한 후 가상의 테이블을 실제 테이블과 동기화 하기위한 작업을 진행하였다. VR 장비 중 Hand Tracker기기의 충전단자와 실제 테이블의 모서리를 일치 시키고 Tracker의 검지 트리거를 누르면 모서리의 위치를 기억한다. 이를 피험자 기준 후면 우측 모서리부터 시계방향으로 각각의 모서리를 입력받게 되며 4모서리의 위치 값으로 가상의 테이블의 위치 및 크기를 최대한 맞추는 작업이 이루어진다. 테이블 동기화 후 책상은 움직이지 않도록 주의하였다. 피험자에게 뇌파장비를 착용하고 Wearable Sensing사에서 제공하는 DSI-24뇌파장비 착용 매뉴얼에 따라 각 전극을 빠르게 회전시켜 머리카락 사이로 두피와 접촉하도록 하였다. 기기 전용 프로그램을 사용하여 각 채널의 임피던스와 특별한 노이즈 이슈가 있는지 확인 하였다. 뇌파기기 설정 완료 후 VR 장비 중 Head Mounted Display(HMD)를 착용 하였는데 이때 Fp1, Fp2 전극과 VR의 이마 스펀지 부분, Fz, Cz, Pz 전극과 고정 밴드 부분을 유의하였다. HMD 착용 완료 후 VR장비를 확인하기 위한 작업을 하였으며 켜진 상태로 두었다. VR이 실험대기 상태에서 다시 뇌파의 임피던스를 확인 후 실험 준비를 완료 하였다.

실험 준비가 완료 되면 시작과 동시에 검은 화면과 중앙에 십자가를 두어 참가자의 뇌파를 안정화를 위한 사전 휴지 상태의 뇌파를 1분간 측정 진행 하였다. VR 프로그램에서는 안정화 직후 수행될 뉴로 피드백에 뇌파의 기준으로 사용하기 위한 뇌파표준화 작업도 동시에 진행하였다. 1분간 사전 휴지 이후 피험자가 10분간 Virtual Mirror Hand(VMH) task를 수행하도록 하였다. VMH task는 이 연구의 핵심이 되는 실험으로 거울 치료를 가상환경에서 구현하고 뉴로 피드백을 제공하여 참가자의 뇌파의 변화를 기록하였다. VMH task가 종료 되고 2초간 검은 화면을 제시하여 다음에 이어질

Reaching task에 영향을 주지 않도록 하였다. Reaching task는 가상 환경에서 거울 치료의 착각 정도를 객관적으로 측정할 수 있도록 설계한 task이다. 실험 종료 전 1분간 휴지 상태의 뇌파를 기록하였고, 이때 처음 시작에서처럼 검은 화면에 십자가를 주시하도록 하였다. 모든 실험 패러다임이 종료되면 뇌파기와 HMD를 탈착 하였으며, 주관적 설문지를 작성하도록 지시 하였다.

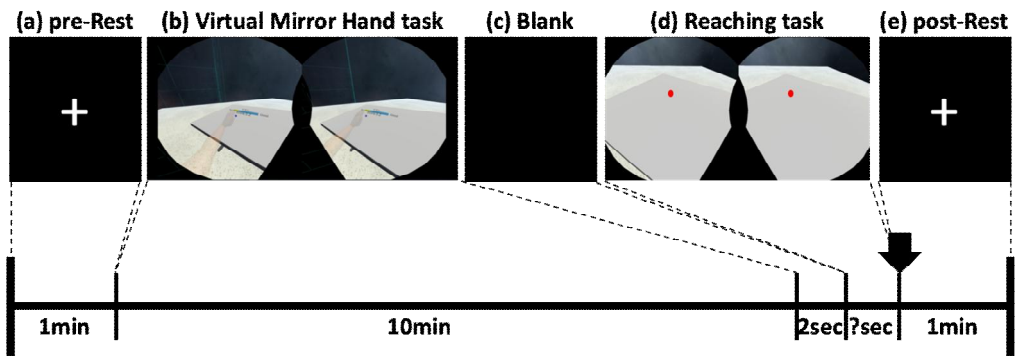


그림 1. 실험 패러다임 순서와 시간

표 2. 주관적 평가 항목

항목	점수
가상의 손을 보면서 마치 내 손을 보고 있는 것처럼 느껴졌다	1~7
나의 손이 가상의 손의 위치와 일치하는 것처럼 보였다	1~7
가상의 손은 시각적으로 내 손과 닮아지는 느낌을 받았다	1~7
가상의 손이 내 신체의 일부처럼 느껴졌다	1~7
가상의 손은 시각적으로 내 손과 닮아지는 느낌을 받았다	1~7
실제 손과 가상의 손 사이의 어딘가에 내 손이 위치해있는 느낌을 받았다	1~7
내 손이 가상의 손으로 변하는 것 처럼 느껴질 때가 있었다	1~7
마치 하나 이상의 왼손이나 팔이 있는 것처럼 느껴졌다	1~7
실제는 오른손을 움직였지만, 마치 왼손이 움직이고 있는 느낌을 받았다	1~7

### 2.2.2. Virtual Mirror Hand task:

참가자가 가상환경에 몰입 할 수 있도록 VMH task는 실제 테이블과 동일한 위치에 가상테이블이 있도록 설정 하였다. 그 테이블 위에 가상의 손이 보이도록 하였으며 거울 치료와 동일한 착각을 주기위해 다음과 같은 설정을 하였다. 오른손에 실험을 위해 제작한 기기를 착용하였는데, BOSCH사의 BNO055칩을 내장하여 지자기3축과 가속계3축 자이로3축 총 9축을 측정하고 그 값을 블루투스 통신을 사용하여 VR시스템으로 실시간 전송하였다. 실제 오른손에 착용한 기기로부터 9축 모션 데이터를 받아서 실시간으로 가상 왼손 모션에 적용하였다. 가상의 오른손은 참가자의 집중을 분산할 수 있어 움직이지 않도록 설정하였다. 또한 참가자에게 외손은 실험 시작부터 끝까지 움직이지 않도록 사전에 지시하였다. 즉, 왼손을 움직이지 않고 오른손으로만 가상의 왼손만 조절하여 거울치료와 동일한 효과를 주었다. 피험자는 오른손의 손목을 위 아래로 움직여서 가상의 왼손을 조종하고 가상의 왼손 끝에서 움직이는 공을 따라가면 점수가 오르도록 하여 모든 피험자의 운동량을 최대한 동일하게 맞추도록 하였다. 이때, 가상의 왼손이 공을 따라 접촉하면 0에서 1사이의 뉴로 피드백 값을 점수에 반영하였고, 따라가지 못하여 접촉하지 못하였을 때는 점수가 오르지 않도록 하여 뉴로 피드백이 점수에 기여하도록 하였다.

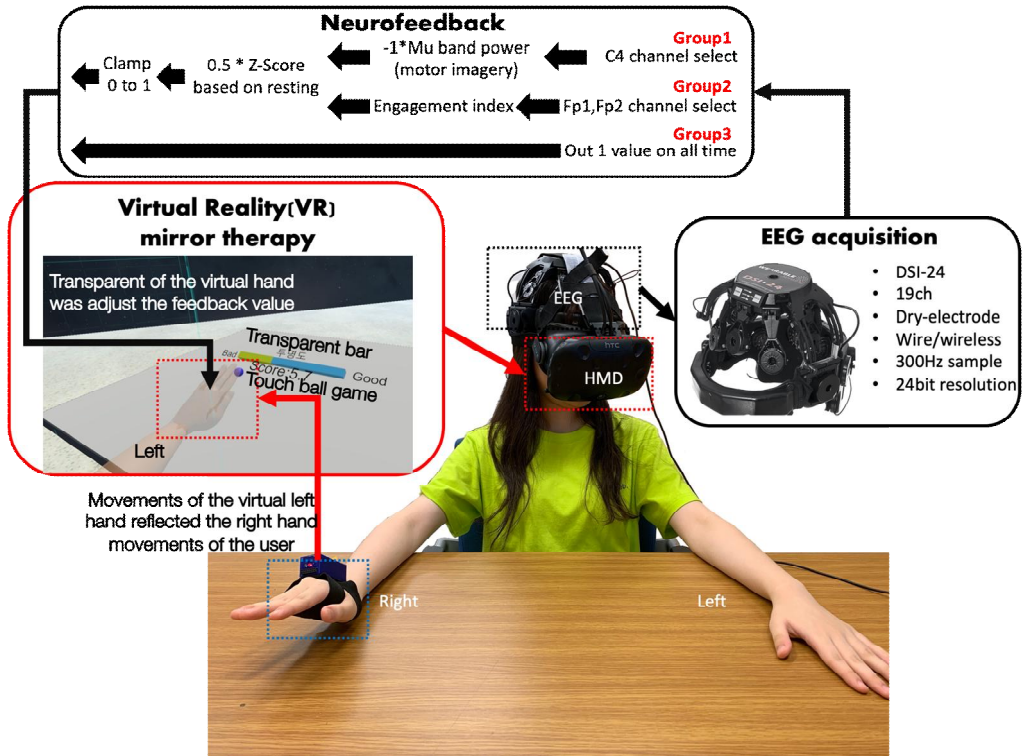


그림 2. 뉴로 피드백을 결합한 가상 환경에서의 거울치료 시스템

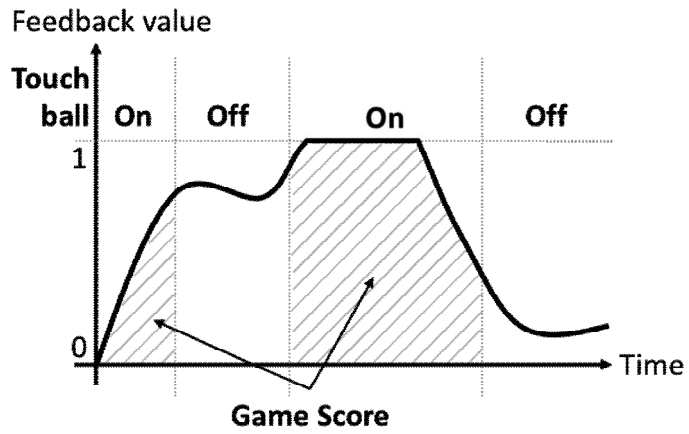


그림 3. 가상 공을 따라가는 게임에서 뉴로 피드백 값에 따라 점수에  
 기여되는 방법



### 2.2.3. 뉴로피드백:

OpenVibe프로그램을 사용하여 뇌파기기에서 실시간으로 모든 채널의 데이터를 받아와서 저장하였다. 각 그룹에 맞는 시나리오를 실행하여 뉴로피드백 값을 계산하였다. 계산된 값은 TCP/IP 통신을 사용하여 VR 프로그램으로 넘겨주었다. VR프로그램에서는 VMH task 전 휴지 상태 1분 동안에 값을 축적한 다음 평균과 표준편차를 사용하여 표준화 작업을 진행하였다. VMH task에 사용된 값은 표준화된 값을 사용하는데 휴지 상태에서 평균과 같으면 0으로, 평균에서 2배의 표준편차는 1또는 -1로 변환하였다. 표준화된 값에서 0에서 1사이 값만 사용하였으며 그 이상은 1로 그 이하는 0으로 고정하여 가상의 왼손에서 투명도에 적용하였다.

참가자의 등록 순서에 따라 3그룹으로 나누어 서로 다른 뉴로 피드백이 적용되도록 설정하였다. 첫 번째 그룹에서는 우반구의 motor cortex 영역의 활성도를 뉴로 피드백 지표로 사용하였다. 손 또는 발을 활동하게 되면 뇌파에서는 그에 대응하는 motor cortex 부분에 mu 리듬이 억제 된다고 알려져 있다(42). 이때 활동 없이 다른 대상의 활동을 관찰하거나 자신의 신체가 움직이는 상상을 할 때에도 신경이 발화되는데 이는 거울신경에 의한 활성화 때문이다. 이 실험에서도 동일하게 자신의 왼손의 활동 없이 가상의 왼손 활동을 관찰하는데 그 활동은 오른손에 의한 활동이므로 가상의 손에 몰입될수록 왼손 영역의 운동 신경이 더욱 활성화 될 것이다. 두 번째 그룹에서는 engagement에 따른 활성도를 지표로 사용하였다. engagement index는 뇌파의 밴드  $\beta/(\alpha + \theta)$ 의 비율로 계산되며 사람이 작업에 인지적으로 참여하는 정도를 추적하는데 사용될 수 있다(43). 마지막 세 번째 그룹은 아무런 피드백 없이 항상 활성화된 값을 적용하였고 가상의 손이 전혀 투명하게 하지 않도록 하여 대조군으로 설정하였다.

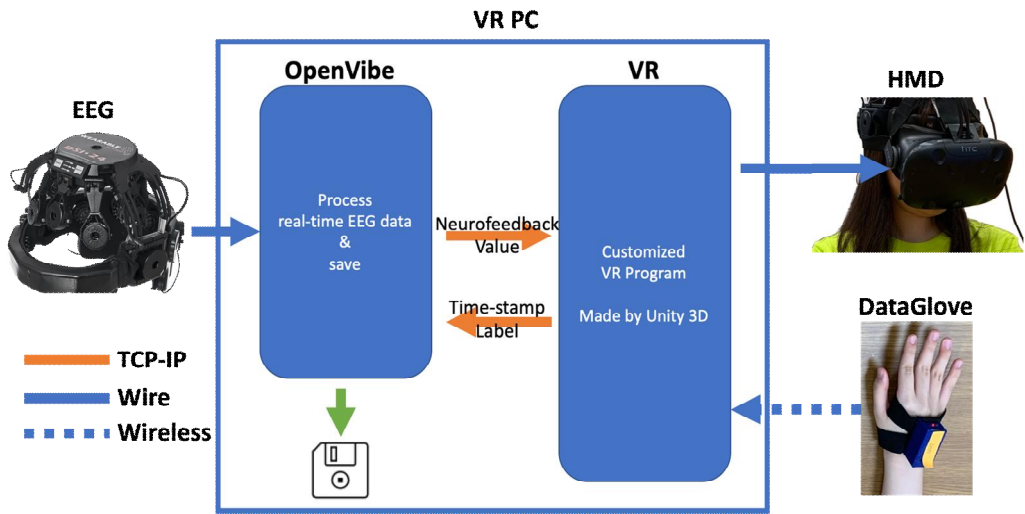


그림 4. 실시간 데이터 흐름 및 통신 종류

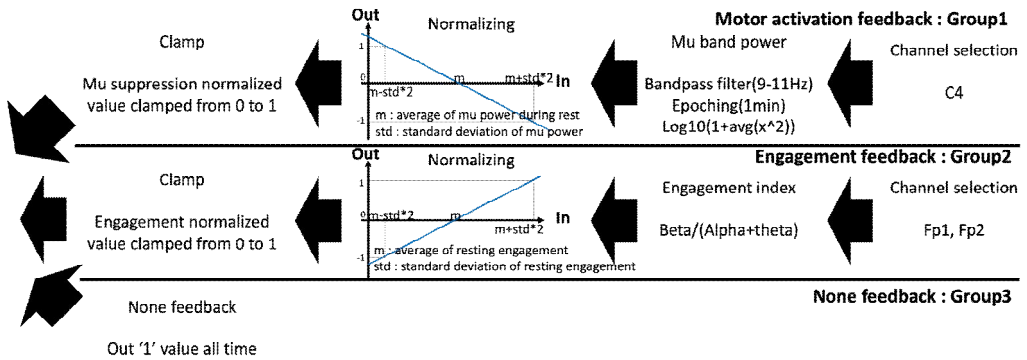


그림 5. 그룹에 따른 뉴로 피드백 실시간 계산 방법

#### 2.2.4. Reaching task:

가상 손의 착각의 척도를 측정하기 위해 개발되었으며 이전 연구에 의해 검증된 작업을 VR 환경에 맞게 적용하여 사용하였다(44,45). 사전 휴지 상태에서 가상의 왼손을 실제 왼손 위치로부터 몸의 바깥 방향으로 10 cm 이동하였다. 참가자는 검은 화면에 십자가만 보이기 때문에 이동한 사실을 알지 못한 상태에서 VMH task를 수행하게 된다. 참가자는 자신의 왼손이 어디에 있는지 가상의 왼손에 동기화 된 정도에 따라서 인지하게 된다. 예를 들어 몰입을 할수록 이동된 가상의 왼손에 동기화 되고 실제 왼손의 위치를 이동된 가상의 위치에 있다고 착각하게 된다. 반대로 가상 손의 착각이 작으면 가상의 왼손에 동기화가 어렵고 왼손 위치를 실제 위치에 있다고 느끼게 된다. 이를 측정하기 위해 다음과 같은 시험을 수행하였다. 가상의 왼손 위치를 본 직후 빨간 공을 이어서 보면 가상 손의 위치에서 유추하거나 겹쳐서 볼 수 있기 때문에 2초간 검은 화면에 노출한 다음 진행하였다. 가상에서 테이블 위에 빨간 공만 두고 그 위치를 오른손으로 표시하게 하였다. 빨간 공은 이동한 가상 왼손의 중지 끝에서부터 몸의 앞쪽 방향으로 10 cm 위치에 있다. 즉 실제 왼손 중지 끝에서 왼쪽으로 10 cm 앞쪽으로 10 cm 위치에 있다. 가상의 왼손과 동기화 되면 왼쪽을 10 cm 이동한 위치에 실제 손이 있다고 느끼고 결과적으로 빨간 공의 위치를 왼손에서부터 앞쪽 10 cm에 표시한다. 동기화 되지 않았다면, 실제 왼손의 위치에 인지하고 빨간 공을 왼쪽 10 cm 앞쪽 10cm에 있다고 느끼게 된다.

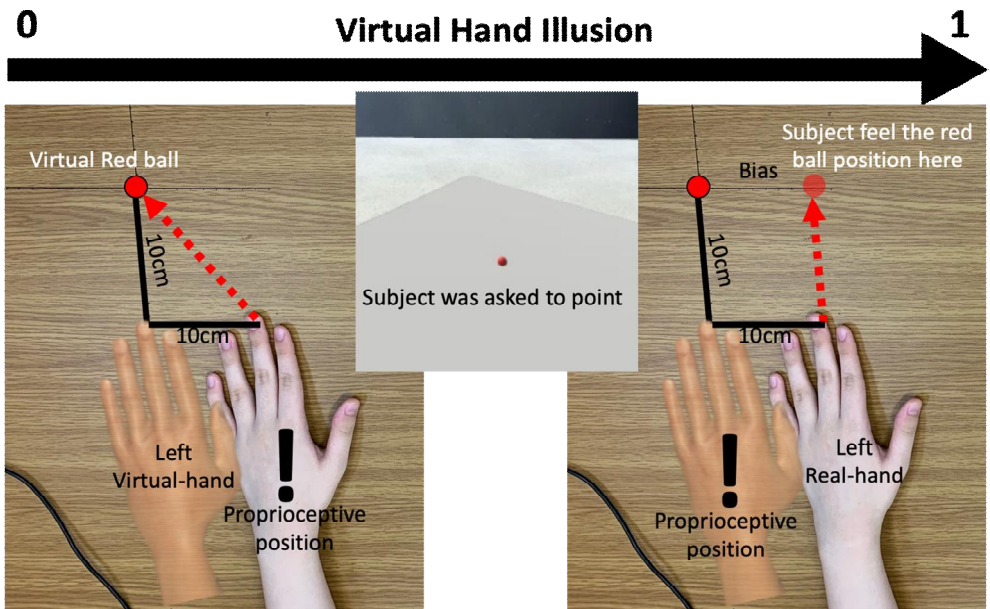


그림 6. 가상 손 동기화에 따른 가상 손 착각의 정도를 측정

### 2.2.5. 뇌파 전처리:

실험의 결과물로 뇌파의 raw data, reaching task의 표시한 위치 데이터, 주관적 설문이 있다. 이중 뇌파 데이터는 잡음이 많아 전 처리를 수행 하였다. 전 처리와 분석에 MathWorks 사의 MATLAB 2019b를 사용하였으며 뇌파 분석 툴 중에 오픈소스로 작성된 EEGLAB을 사용하였다. 뇌파기기에서 측정된 데이터는 Pz를 reference로 설정되어 있는데 이를 common reference로 re-referencing 하였다. Power noise와 DC offset을 제거하기 위해 60Hz notch filter와 1Hz ~ 40Hz band pass filter를 적용 하였다. HMD와 뇌파기기를 동시 착용하고 활동을 하였기 때문에 움직임에 따른 잡음을 제거해 주어야 하는데 Artifact Subspace Reconstruction(ASR)을 사용하여 큰 신호를 동반한 잡음을 제거하여 주었다(46). 마지막으로 눈의 움직임에 따른 잡음을 독립 성분 분석 기법(Independent Component Analysis, ICA)을 사용하여 제거하여 주었다(47). VR 프로그램에서 보내어 동시에 기록한 time label을 기준으로 각 session을 나누어 개별적으로 분석을 하였다.

앞서 수집된 뇌파데이터를 분석하기 위해 Welch의 중첩 세그먼트 평균화 추정량(Welch 's overlapped segment averaging estimator)을 사용하여 파워 스펙트럼 밀도(PSD) 추정값을 구하였다. 모든 데이터는 실험 시작 후 휴식 1분간의 데이터를 기준으로 계산하였다. 계산은 MVH task의 데이터에서 pre-Resting의 데이터를 나누어 주고  $10 \cdot \log_{10}$  수식을 사용하여 dB단위로 계산하였다.

## 3. 성 적

### 3.1. 연구 결과:

#### 3.1.1. 뇌파

그림 7에서 각 그룹마다의 평균을 구하고 topo-map으로 mu band의 파워를 시각화 하였다. 손의 운동이 활성화 되었을 때 그에 해당하는 motor cortex에서 mu band 파워는 억제 된다고 연구된바 있다. 그룹 1에서는 왼손의 motor cortex 활성도를 feedback주었고 그룹 2에서는 물입도를, 그룹 3에서는 feedback을 주지 않았을 때 모든 그룹에서 왼손 활동에 해당하는 C4 채널의 mu band가 억제되어 있음을 보았다. 이는 뉴로 피드백과의 유무와 상관없이 모든 그룹에 가상환경에서 거울치료가 효과가 있음을 보여주었다. 또한 그룹별 효과를 분석하기 위해 paired t-test 수행하였을 때, C4 채널에서 통계적 유의미한 차이를 보았다. 즉 뉴로 피드백을 주지 않은 그룹보다 주었던 그룹에서 mu 파워 억제가 보이며 그중 왼손 motor activation을 피드백으로 주었던 그룹에서 mu 파워 억제가 컸다.

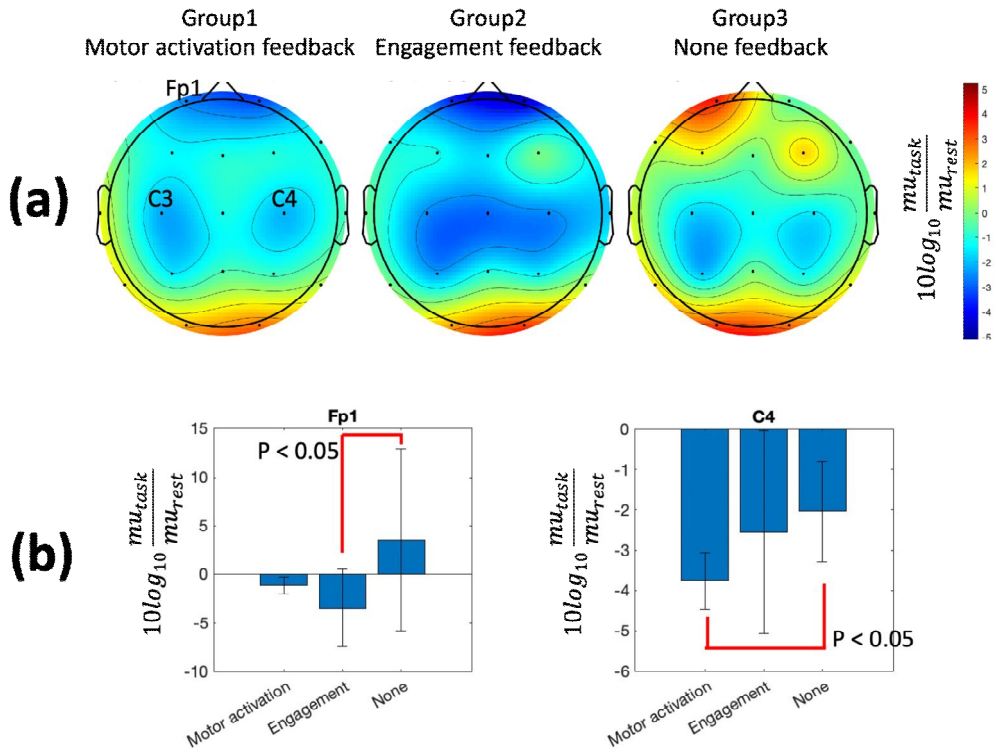


그림 7. (a) 각 그룹에서 mu band power의 topo-map. (b) 각 그룹별 Fp1과 C4 채널의 mu band power 억제 값( $p < 0.05$ )



### 3.1.2. 객관적 평가 척도

Reaching task에서 참가자가 표시한 가상의 빨간공의 위치들을 수기로 기록하였다. 각 그룹별로 표시한 위치를 하나의 표에 그려보았다. 가상의 빨간 공의 좌표를 영점으로 하여 cm 단위로 표시 하였으며 가상의 손과 실제 손이 있었던 위치도 함께 표현 하였다. 세 그룹의 평균과 표준편차를 계산하였는데 X축과 Y축 별도로 계산하여 표에 표시하였다. One way ANOVA를 사용하여 통계적 차이를 보고자 하였으나 유의미한 결과를 얻지는 못하였다. 하지만 평균적인 위치를 보았을 때 가상의 빨간 공에서 가장 가까운 그룹이 뉴로 피드백을 주지 않았던 그룹이었다. 빨간 공과 가깝게 표시할 수록 가상에 몰입하지 못하였다고 볼 수 있고 더 나아가 거울 치료의 효과가 떨어진다고 볼 수 있다. 뉴로 피드백을 주었던 두 그룹은 빨간 공과 평균위치의 거리가 차이가 없었다.

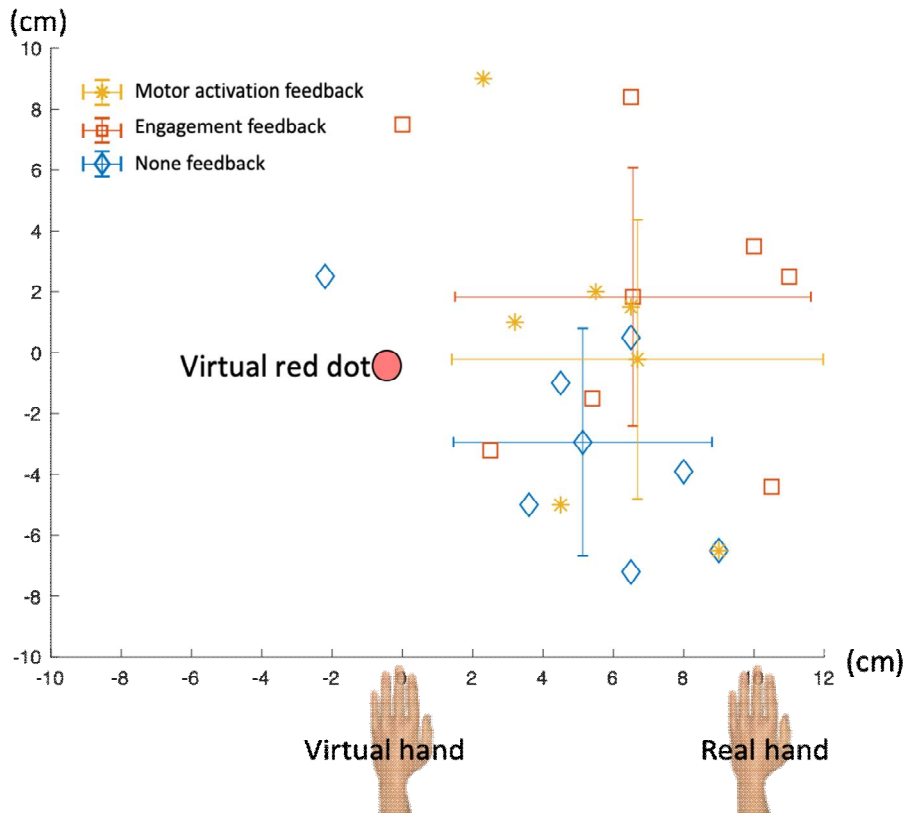


그림 8. 인지 기반 착각 척도 평가 결과(cm)

## 4. 고 찰

본 논문에서는 가상환경에서 기존 편마비 환자에게 행해지는 거울치료를 구현 하였고 뇌파를 이용한 뉴로 피드백을 적용하여 효과를 보고자 하였다. 피험자 수가 상대적으로 적은 수에도 불구하고 외손 motor cortex에서 통계적인 유의미한 차이를 보여 뉴로 피드백의 효과를 입증하였다. 하지만 시스템이 복잡도와 가상환경의 콘텐츠 부족으로 아직은 병원에서 재활에 이용하기에는 어려울 것으로 보인다. 그러나 가상환경의 시스템이 발전하고 뇌파 지표들의 고도화 가능성 여지가 충분히 있으므로 뉴로 피드백을 접목한 재활치료에 기대하는 바가 크다.

뇌졸중에 의한 마비에서 초기 재활의 중요성이 크지만 기존 전통적인 재활에는 환자의 저조한 참여율이 큰 문제로 대두되고 있다. VR의 가상의 환경에서는 신체적인 제약 없이 가상의 캐릭터를 움직일 수 있어 지루하지 않으며 자유롭게 재활 치료를 구현할 수 있다는 장점이 크다. 여기에 더 나아가 뉴로 피드백을 적용하면, 환자의 모니터링의 수월함과 적극적인 참여를 이끌어 내는데 큰 도움을 얻을 수 있을 것이다.

추후 후속 연구로 단순한 게임 보다 흥미를 유발할 수 있는 콘텐츠를 뉴로 피드백과 결합하여 환자에게 적용해 볼 수 있다. 또한 뇌졸중 환자에게 장기적인 뇌파 데이터를 수집하면 각 환자별로 효과를 입증 가능하게 할 것이다. 이어서 각 환자에게 맞는 콘텐츠를 뇌파 데이터를 보고 객관적인 판단을 할 수 있는 연구가 이어질 것이다.

## 5. 요약

뇌졸중 이후 가장 많은 증상중 하나인 편마비 증상은 73% ~ 88%가 경험하고 있다. 편마비 이후 재활에 따라서 신경학적 회복이 달라지는데 3개월 이내에 신경 회복이 가장 활발히 이루어지면 이후 6개월까지 더디게 이루어진다. 이후에 회복하지 못하고 영구 장애를 얻는 비율이 17%나 되기 때문에 초기 재활의 중요성이 부각되고 있다. 전통적인 재활은 반복적인 단순 운동으로 지속 불가능 하며, 양측 균형 있는 재활에 어려움을 겪고 있다. 본 논문은 이러한 문제점들을 보완하기 위해 거울 재활 치료를 가상 환경에 구현 하여 단순한 운동을 넘어 복잡한 활동이 가능하다. 여기서 더 나아가 뇌가소성의 가속화를 위한 뉴로 피드백 시스템을 결합하고 뇌파로 정량적인 재활 효과를 분석하고자 한다. 실험을 위해 일반인 21명을 3그룹으로 나누어 뉴로 피드백이 있는 두 그룹과 없는 그룹으로 진행 하였다. 두 그룹에는 서로 다른 뉴로 피드백을 주었는데 한 그룹은 왼손 관찰 운동 활성화를, 나머지 그룹은 몰입도를 피드백으로 주었다. 참가자는 오른손의 운동과 동일하게 움직이는 가상의 왼손을 바라보며 왼손이 움직이는 느낌을 받도록 함으로 거울 치료 효과를 주었다. 실험 중 측정된 뇌파를 분석하여 운동영역의 활성화 보았다. 3 그룹 모두에서 움직이지 않은 왼손 영역의 운동 신경이 활성화 된 것을 확인하였으며 실제로 움직인 오른손의 활성화도와 비슷한 수준이 이었다. 그룹별 차이는 크지 않았지만 뉴로 피드백을 주지 않았던 그룹에서 왼손 활성화가 운동 활성화를 피드백으로 주었던 그룹 통계적으로 유의미하게 작았다. 뇌졸중에 의한 편마비 재활에서 게임을 접목한 거울 재활 운동을 가상 시스템으로 구현하였으며 뉴로 피드백을 추가하여 실제 양측 운동의 뇌 활성화를 확인하였다. 뉴로 피드백을 적용한 가상현실에서 재활 시스템의 쓰임이 넓을 것으로 시사한다.

## 참 고 문 헌

1. Donnan GA, Fisher M, Macleod M, Davis SM. Stroke. Lancet 2008; 371(9624): 1612-1623.
2. Adams HP Jr, Bendixen BH, Kappelle LJ, Biller J, Love BB, Gordon DL, et al: Classification of subtype of acute ischemic stroke. Definitions for use in a multicenter clinical trial 1993; 24(1): 35-41.
3. Vos T, Allen C, Arora M, Barber RM, Bhutta ZA, Brown A, et al: Global, regional, and national incidence, prevalence, and years lived with disability for 310 diseases and injuries, 1990-2015: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2015. The lancet 2016; 388(10053): 1545-1602.
4. Pyun SB, Kim SH, Hahn MS, Kwon HK, Lee HJ. Quality of Life after Stroke. Annals of Rehabilitation Medicine 1999; 32: 233-239.
5. DeLisa JA, Gans BM, Bockenek WL, Currie DM, Geiringer SR, Gerber LH, et al. Stroke rehabilitation. Physical Medicine and rehabilitation 1998; 125: 1165-1189.
6. Garraway WM, Akhtar AJ, Smith DL, Smith ME. The triage of stroke rehabilitation. J Epidemiol Community Health 1981; 35: 39-44.

7. Gresham GE, Duncan PW, Stason WB, Adams HP, Adelman AM, Alexander DN, et al: Post-Stroke Rehabilitation. Clinical Practice Guideline 16. Rockville 1995; 12: 1-248
8. Kalra L: The influence of stroke unit rehabilitation on functional recovery from stroke. Stroke 1994; 25: 821-825.
9. Cohen LG, Hallett M: Neural plasticity and recovery of function. Neurological Rehabilitation 2003; 312: 99-111
10. Cramer SC: Stroke recovery: how the computer reprograms itself. Neuronal plasticity: the key to stroke recovery. Kananskis, Alberta, Canada, Mol Med Today 2000; 6(8): 301-3.
11. Azari NP, Rüdiger JS: “Brain Plasticity and Recovery from Stroke: What Has Changed in the Brain of a Stroke Patient Who Recovers the Ability to Move a Once-Disabled Limb?” . American Scientist, vol. 88, no. 5, 2000; 88: 426-431.
12. Nudo RJ, Wise BM, SiFuentes F, Milliken GW: Neural substrates for the effects of rehabilitative training on motor recovery after ischemic infarct. Science 1996; 272(5269): 1791-4.
13. Duncan PW, Lai SM, Keighley J: Defining post-stroke recovery: implications for design and interpretation of drug trials. Neuropharmacology 2000; 39(5): 835-841.

14. Kelso JA Scott: Dynamic patterns: The self-organization of brain and behavior. MIT press 1995;
15. Slater M, Wilbur S: A framework for immersive virtual environments (FIVE): speculations on the role of presence in virtual environments. Presence: Teleoperators and Virtual Environments 1997; 6: 603-616.
16. Slater M: Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments. Philosophical Transactions of the Royal Society London Series B, Biological Science 2009; 364: 3549-3557.
17. Hoffman HG, Patterson DR, Carrougher GJ, Sharar SR: Effectiveness of virtual reality-based pain control with multiple treatments. The Clinical Journal of Pain 2001; 17: 229-235.
18. Matamala-Gomez M, Donegan T, Bottiroli S, Sandrini G, Sanchez-Vives MV, Tassorelli C: Immersive virtual reality and virtual embodiment for pain relief. Frontiers in Human Neuroscience 2019; 13: 279.
19. Thieme H, Morkisch N, Mehrholz J, Pohl M, Behrens J, Borgetto, B, et al: Mirror therapy for improving motor function after stroke. Cochrane Database of Systematic Reviews 2018; 7: CD008449.

20. Karamians R, Proffitt R, Kline D, Gauthier LV: Effectiveness of virtual reality-and gaming-based interventions for upper extremity rehabilitation poststroke: a meta-analysis. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* 2019; 101: 885-896.
21. Riva G, Wiederhold BK, Mantovani F: Neuroscience of virtual reality: from virtual exposure to embodied medicine. *Cyberpsychology, Behaviour and Social Networking* 2019; 22: 82-96.
22. Riva G, Banos RM, Botella C, Mantovani F, Gaggioli A: Transforming experience: the potential of augmented reality and virtual reality for enhancing personal and clinical change. *Frontiers in Psychiatry* 2016; 7: 164.
23. Weber LM, Nilsen DM, Gillen G, Yoon J, Stein J: Immersive virtual reality mirror therapy for upper limb recovery after stroke: a pilot study. *American Journal of Physical Medicine and Rehabilitation* 2019; 98: 783-788.
24. Shibuya S, Unenaka S, Ohki Y: The relationship between the virtual hand illusion and motor performance. *Frontiers in Psychology* 2018; 9: 2242.
25. Nojima I, Mima T, Koganemaru S, Thabit MN, Fukuyama H, Kawamata T: Human motor plasticity induced by mirror visual feedback. *Journal of Neuroscience* 2012; 32: 1293-1300.



26. Ramachandran VS, Altschuler EL: The use of visual feedback, in particular mirror visual feedback, in restoring brain function. *Brain* 2009; 132(7): 1693-1710.
27. Witmer BG, Singer MJ: Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire. *Presence* 1998; 7(3): 225-240.
28. Huster RJ, Mokom JN, Enriquez-Geppert S, Herrmann CS: Brain-computer interfaces for EEG neurofeedback: peculiarities and solutions. *Int J Psychophysiol* 2014; 91(1): 36-45.
29. Gruzelier JH: EEG-neurofeedback for optimising performance. II: creativity, the performing arts and ecological validity. *Neurosci Biobehav* 2014; 44: 142-158.
30. Alkoby O, Abu-Rmileh A, Shriki O, Todder D: Can we predict who will respond to neurofeedback? A review of the inefficacy problem and existing predictors for successful EEG neurofeedback learning. *Neuroscience* 2017; 378: 155-164.
31. Rayegani SM, Raeissadat SA, Sedighipour L, Rezazadeh IM, Bahrami MH, Eliaspour D, et al: Effect of neurofeedback and electromyographic-biofeedback therapy on improving hand function in stroke patients. *Top Stroke Rehabil* 2014; 20(2): 137-151.
32. Strehl U, Birkle SM, Worz S, Kotchoubey B: Sustained reduction of seizures in patients with intractable epilepsy after self-regulation training of slow cortical potentials- 10 years after. *Front Hum*

Neurosci 2014; 8: 604.

33. Sonuga-Barke EJ, Brandeis D, Cortese S, Daley D, Ferrin M, Holtmann M, et al: Nonpharmacological interventions for ADHD: systematic review and meta-analyses of randomized controlled trials of dietary and psychological treatments. *Am J Psychiatry* 2013; 170(3): 275-289.

34. Arns M, Ridder S, Strehl U, Breteler M, Coenen A: Efficacy of neurofeedback treatment in ADHD: the effects on inattention, impulsivity and hyperactivity: a meta-analysis. *Clin EEG Neurosci* 2009; 40(3): 180-189.

35. Tan G, Thornby J, Hammond DC, Strehl U, Canady B, Arnemann K: Meta-analysis of EEG biofeedback in treating epilepsy. *Clin EEG Neurosci* 2009; 40(3): 173-179.

36. Doppelmayr M, Nosko H, Pecherstorfer T, Fink A: An attempt to increase cognitive performance after stroke with neurofeedback. *Biofeedback* 2007; 35(4): 126-130.

37. Leins U, Goth G, Hinterberger T, Klinger C, Rumpf N, et al: Neurofeedback for children with ADHD: a comparison of SCP and Theta/Beta protocols. *Appl Psychophysiol Biofeedback* 2007; 32(2): 73-88.

38. Sterman MB, Egner T: Foundation and practice of neurofeedback for the treatment of epilepsy. *Appl Psychophysiol Biofeedback* 2006;

31(1): 21-35.

39. Thompson L, Thompson M: Neurofeedback intervention for adults with ADHD. *J Adult Dev* 2005; 12(2-3): 123-130.

40. Walker JE, Kozlowski GP: Neurofeedback treatment of epilepsy. *Child Adolesc Psychiatr Clin N Am* 2005; 14(1): 163-176.

41. Kotchoubey B, Strehl U, Uhlmann C, Holzapfel S, König M, Fröscher W, et al: Modification of Slow Cortical Potentials in Patients with Refractory Epilepsy: A Controlled Outcome Study. *Epilepsia* 2001; 42(3): 406-416.

42. Hobson HM, Bishop DV: Mu suppression-a good measure of the human mirror neuron system?. *cortex* 2016; 82: 290-310.

43. Pope AT, Bogart EH, Bartolome DS: Biocybernetic system evaluates indices of operator engagement in automated task. *Biol Psychol* 1995; 40(1-2): 187-195.

44. Holmes NP, Spence C: Visual bias of unseen hand position with a mirror: spatial and temporal factors. *Experimental Brain Research* 2005; 166: 489-497.

45. Jax SA, Rosa-Leyra DL, Coslett HB: Enhancing the mirror illusion with transcranial direct current stimulation. *Neuropsychologia* 2015; 71: 46-51.

46. Plechawska-Wojcik M, Kaczorowska M, Zapala D: The Artifact Subspace Reconstruction (ASR) for EEG Signal Correction. A Comparative Study. Information Systems Architecture and Technology: Advances in Intelligent Systems and Computing 2019; 853: 125-135

47. Mammone N, La Foresta F, Morabito FC: Automatic artifact rejection from multichannel scalp EEG by wavelet ICA. IEEE Sensors Journal 2011; 12(3): 533-542.

# Neurofeedback Effect on Virtual Reality to Rehabilitate Upper Limb

임 승 의

Department of Biomedical Engineering

Graduate School

Keimyung University

(Supervised by Professor 구 정 훈)

## (Abstract)

This study combined mirror therapy and virtual reality, a treatment method wherein post-stroke patients experience visual illusion by looking at the movement of paralyzed limbs reflected in the mirror and improve paralyzed parts. A game that incorporated neurofeedback into a virtual hand is provided as upper-limb rehabilitation training to explore the change in the brain depending on the existence and types of neurofeedback.

A total of 21 healthy adults (age  $24.77 \pm 4.22$ , 16 men and 6 women) participated in the study, and participants were required to experience virtual reality mirror therapy for 10 minutes on condition of neurofeedback or no neurofeedback. The experiment was carried out by dividing the participants into a group provided with concentration and another group provided with a degree of illusion among the conditions with neurofeedback. During their experience of mirror therapy with virtual reality, it was ensured that the movement of their right hands was reflected to their virtual left hands; depending on the group, the degree of concentration or illusion of the neurofeedback system changed the transparency of the virtual left hand to adjust the degree of immersion in the mirror therapy. At the same time, their electroencephalography was recorded, the size of their illusion was

measured, and they were required to fill out the questionnaire.

The group with neurofeedback in the mirror therapy with virtual reality had lower mu suppression of C4 compared to the group without neurofeedback. In other words, virtual movements may be deemed to have caused more illusions when neurofeedback is given. There was no statistical difference with the case wherein the degree of illusion or concentration was added to neurofeedback, with an average difference found. Therefore, mirror therapy, a rehabilitation training incorporating neurofeedback, helps patients be better absorbed in the experiment, and it is expected to be effective in brain activation.

# VR환경을 이용한 상지 재활 치료에서 뉴로피드백 종류에 따른 뇌파의 변화와 효과

임 승 의

계 명 대 학 교 대 학 원  
의학과 의용공학 전공

(지도교수 구 정 훈)

(초록)

본 연구는 뇌졸중 환자가 거울에 비친 비 마비 측 사지의 움직임에 보고 시각적 착각을 일으켜 마비 측 기능을 향상 하는 치료 방법인 거울 치료를 가상현실에 구현하였으며, 가상 손에 뉴로 피드백을 접목한 게임을 상지 재활 치료 훈련으로 실시하여 뉴로 피드백의 유무와 종류에 따른 뇌의 변화를 알아보았다.

21명의 건강한 성인(평균 24.77세, 표준편차 4.22, 남성16명 여성6명)이 연구에 참여했으며, 참가자들은 뉴로 피드백이 있는 조건 또는 없는 조건에 따라 가상현실 거울치료를 10분간 경험하도록 하였다. 뉴로 피드백이 있는 조건 중 집중력을 주는 그룹과 착각 정도를 주는 그룹으로 나누어 실험을 진행 하였다. 가상현실 거울치료를 경험하는 동안 실제 오른손의 움직임이 가상의 왼손에 반영되도록 하였고, 그룹에 따라 뉴로 피드백 시스템의 집중도 또는 착각정도를 가상 왼손의 투명도가 바뀌도록 하여 거울 치료 몰입도를 조절 하였다. 동시에 뇌전도를 기록하고, 착각 크기를 측정했으며, 참가자들은 설문지에 대한 답변을 작성하였다.

가상현실 거울치료 에서 뉴로 피드백으로 주었던 그룹에서 C4의 mu suppression이 주지 않았던 그룹에 비해 낮았다. 즉, 가상의 움직임을 뉴로 피드백을 주었을 때 더 많은 착각을 유발 하였다고 볼 수 있다. 뉴로 피드백에서 착각 정도와 집중력을 주었을 때의 통계적 차이는 없었지만 평균적인 차이를 보였다. 따라서 뉴로 피드백을 접목한 재활 치료 훈련인 거울 치료는 환자가 실험에 더 몰입할 수 있도록 하며 뇌 활성화에 효과를 줄 수 있을 것이다.