creative commons

COMMONS DEED

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

dCollection

체육학박사 학위논문

명시적 유도전략을 활용한 손 뻗기 과제에서 소뇌 비침습 자극별 운동수행 비교

2022년 8월

서울대학교 대학원

체육교육과

서 혜 진

명시적 유도전략을 활용한 손 뻗기 과제에서 소뇌 비침습 자극별 운동수행 비교

지도교수 김 선 진

이 논문을 체육학박사 학위논문으로 제출함

2022년 8월

서울대학교 대학원

체육교육과

서 혜 진

서혜진의 박사 학위논문을 인준함

2022년 8월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

위 원 _____ (인)

위 원 _____ (인)

국문초록

명시적 유도전략을 활용한 손 뻗기 과제에서 소뇌 비침습 자극별 운동수행 비교

서 혜 진
서울대학교 대학원
체 육 교 육 과

인간은 다양한 형태의 학습을 통해 새로운 운동행동에 대한 지식을 습득하며, 일반적으로 연구되는 두 가지 학습의 형태는 암묵적 학습과 명시적 학습에 기반한 감각 운동학습이다. 본 연구에서는 소뇌 비침습적 자극을 주고 두 학습 방법을 통한 감각지각 운동 수행을 관찰하였다. 이때, 소뇌의 활성화 정도가 감각 운동수행에 미치는 영향을 관찰함으로써 소뇌의 기능적 역할에 관해 탐구해보고자 하였다. 모든 참여자는 과제를 수행하기에 신경학 및 정형외과적 결함이 없는 건강한 성인 남자 32명(집단별: 8명, 평균 나이=26.1±4.9, 만19-37세)이 참여하였다. 실험과제는 하나의 출발지점에서 목표지점으로 팔을 뻗는 도중 외력(force-field)이 주어지며, 참여자는 이를 극복하고 정확하게 직선으로 목표지점을 향해 팔을 뻗는 과제이다. 이러한 과정에서 암묵적 유도전략 집단(1집단:sham)과 명시적 유도전략 집단(3집단:anode, cathode, sham)의 운동수행 변화를 살

펴보고, 다양한 극성의 ctDCS가 명시적 유도전략(3집단)이 주어진 지각운동 수행에서 나타나는 행동 양상을 비교 분석하였다.

그 결과, 명시적 유도전략과 암묵적 유도전략은 적응 속도 및 적응 정도가 다르게 나타났다. 명시적 유도전략 집단은 반응시간(RT)이 느렸으나 수행이 거듭될수록 빨라졌으며, 움직임의 수행에 따라 운동시간(MT)을 줄였다. 이에 반해 암묵적 전략은 안정적인 수행의 변화와 빠른 반응시간(RT)을 나타냈다. 탈적응 구간을 통해 각 학습 요인의 공고화를 살펴본 결과, 수행 중에는 나타나지 않았던 수행 의도가 명시적 유도전략 집단에서 외력이 사라진 후에도 강하게 남아있었다. 또한, 수행의 정확도가 유의하게 커, 암묵적 유도전략 집단보다 학습의 잔존효과가 더욱 남아있는 것으로 나타났다.

ctDCS의 극성에 따른 명시적 유도전략의 지각운동 수행을 살펴본 결과, ctDCS의 양극(anode)은 음극(cathode) 또는 무극(sham:거짓 자극)에 비해 의도적 움직임이 강하게 나타나고, 학습 초기 오류를 수정하기 위한 움직임 가변성이 크게 나타났다. 또한, 초기 학습 후 학습의 효과를 살펴보기 위한 탈적응 1구간에서 ctDCS의 양극을 처치한 집단에서 더 의도적으로 외력에 대응하는 움직임을 나타냈으며, 탈적응 2 결과에서는 집단 간 유의한 차이가 나타나지 않았다. 마지막으로 학습 전이의 효과를 살펴본 결과, 시기에 따른 유의한 차이는 나타났으나, 집단 간 차이는 나타나지 않아 전이의 효과는 없는 것으로 나타났다. 따라서, 소뇌의 양극 자극이 짧은 구간(short-term)에서 더욱 학습의 효과를 나타내며, 움직임에 관여하는 의도가 지각운동 수행에서 더욱 강하게 작용한 것으로 보인다.

주요어 : 소뇌, 소뇌 경두개직류전기 자극(ctDCS), 암묵적 학습, 명시적 학습, 비침습 뇌 자극, 적응과제, 감각지각 운동, 피드백

학 번 : 2016-30439

목차

I. 서론 ····· 1

1. 연구의 필요성 ····· 1
2. 연구목적 ····· 7
3. 연구가설 ····· 8
4. 용어의 정의 ····· 9

II. 이론적 배경 ····· 11

1. 운동학습과 운동제어의 이론적 기반 ····· 11
   1) 정보처리와 계산론적 관점 ····· 11
   2) 다이내믹과 생태학적 관점 ····· 14
2. 운동학습과 인지과정 ····· 15
   1) 의식과 무의식 ····· 15
   2) 운동학습과 기억체계 ····· 17
   3) 암묵적 학습과 명시적 학습의 설명 기제 ····· 19
3. 운동학습과 인지 전략의 다양성 ····· 22
   1) 운동학습과 인지 전략과의 관계 ····· 22
   2) 지각운동 적응과제 ····· 24
4. 운동학습과 신경생리학적 기전 ····· 28
   1) 운동학습과 소뇌(cerebellum) ····· 28
   2) 비침습적 뇌 자극에 의한 뇌의 재조직화와 그 효과 ····· 31

Ⅲ. 연구방법 ····· 33

1. 연구대상 ····· 33
2. 실험장비 ····· 34

1) Kinarm Exoskeleton 로봇 ····· 34
2) 경두개 직류 전기자극 장치(tDCS) ····· 35
3. 실험절차 ····· 36
1) 참여자모집 및 사전교육 ····· 36
2) 외력이 주어진 지각운동과제 수행 ····· 37
3) tDCS 극성에 따른 명시/암묵 유도전략 집단에 따른 지각운동 적응과제 · 41
4. 실험설계 ····· 42
5. 자료수집 및 분석 ····· 43
1) 지각운동 적응(학습) 과제 수행 관련 변인 분석 ····· 44
2) Data cleansing ····· 49
6. 통계처리 ····· 50

Ⅳ. 연구결과 ····· 51
1. 인지 전략에 따른 지각운동 적응(학습)수행의 차이 ····· 51
1) 명시적 / 암묵적 유도전략에 따른 지각운동 수행 비교 ····· 52
2. 소뇌 비침습 자극의 극성에 따른 지각운동 수행의 변화 ····· 71
1) ctDCS 극성 별 명시적 유도전략에 따른 수행 비교 ····· 71
2) ctDCS 극성 별 지각운동 수행의 왼손 전이 효과 ····· 91

Ⅴ. 논의 ····· 101
1. 인지 전략에 따른 지각운동 적응(학습)수행의 차이 ····· 101
2. tDCS 자극별 명시적 유도전략 학습에 따른 수행 비교 ····· 104
3. ctDCS의 자극 여부에 따른 지각운동 수행의 왼손 전이 효과 ····· 106

Ⅵ. 결론 및 제언 ····· 107
1. 결론 ····· 107
2. 제언 ····· 109

참고문헌 ····· 110
Abstract ····· 123

표 목차

표 1. 본 실험의 참여자 특성 ····· 33
표 2. 실험 설계 ····· 43
표 3. 모든 집단의 RT/MT 기준선 검사의 일원배치 분산분석 결과 · 52
표 4. 평균 반응시간(RT)과 운동시간(MT) 독립 t-검증 결과 ····· 54
표 5. 집단(2수준)과 시기(3수준)에 따른 DE 비교 ····· 55
표 6. 전체 평균 반응시간(RT)과 운동시간(MT) 독립 t-검증 결과 ····· 59
표 7. 각 집단 내 변인 별 대응표본 t-검정 결과 ····· 62
표 8. 집단별 시기에 따른 지각운동 수행과정의 요인별 특징 ····· 63
표 9. 집단(2수준)과 시기(2수준)에 따른 RT비교 ····· 64
표 10. 집단(2수준)과 시기(2수준)에 따른 MT비교 ····· 65
표 11. 집단(2수준)과 시기(2수준)에 따른 HA비교 ····· 67
표 12. 집단(2수준)과 시기(2수준)에 따른 DE비교 ····· 70
표 13. 적응 1구간의 ctDCS 극성 별 명시적 유도전략 집단의 RT, MT 비교 72
표 14. 집단(3수준)과 시기(3수준)에 따른 RT 비교 ····· 73
표 15. 집단(3수준)과 시기(2수준)에 따른 DE 비교 ····· 74
표 16. 시기(3수준: early, middle, late)별 음수와 양수의 빈도 분석 ··· 75
표 17. 집단(3수준)과 시기(2수준)에 따른 HA 비교 ····· 76
표 18. 집단과 시기에 따른 DE비교 ····· 76
표 19. 각 집단의 탈적응 1구간 시기별(3수준) DE 기술 통계량 ····· 78
표 20. AE 집단 내 RT와 MT 대응표본 t-검정 결과 ····· 82
표 21. CE 집단 내 RT와 MT 대응표본 t-검정 결과 ····· 82
표 22. 집단(3수준)과 시기(2수준)에 따른 HA비교 ····· 85
표 23. 집단별 시기에 따른 지각운동 수행과정의 요인별 특징 ····· 86
표 24. 집단과 시기에 따른 DE 비교 ····· 88
표 25. 집단(2수준)과 시기(2수준)에 따른 DE비교 ····· 90

표 26. 모든 집단의 왼손 기준선 검사의 일원배치 분산분석 결과 ·· 91
표 27. 집단과 시기에 따른 DE비교 ····· 95
표 28. 각 집단 내 대응표본 t-검정 결과 ····· 99

그림 목차

그림 1. Kinarm Exoskeleton Robots 장비 구성 및 실험 장면 ····· 34
그림 2. 소뇌 부위의 tDCS 장착 모습 ····· 35
그림 3. 연구절차 ····· 36
그림 4. 실험절차 ····· 37
그림 5. 기준선 검사 구간의 과제 수행 절차 ····· 38
그림 6. 적응 1, 2구간의 과제 수행 절차 ····· 39
그림 7. 외력(force-field)이 주어진 상태 예시 ····· 40
그림 8. 암묵적 유도전략 집단의 적응구간 과제 조건 ····· 42
그림 9. 반응시간 측정 방법 ····· 44
그림 10. 4초 내 도달하지 못한 경우 ····· 45
그림 11. 반응시간과 운동시간의 측정구간 ····· 46
그림 12. 거리오차(Distance Error) ····· 47
그림 13. 헤딩각도(Heading Angle) ····· 47
그림 14. 지수 감소 함수(AC) ····· 48
그림 15. 제한 운동시간을 초과한 경우 ····· 49
그림 16. 목표 타겟에 도달하지 않은 경우 ····· 49
그림 17. 암묵 및 명시적 집단별 기준선 검사의 마지막 시도 양상 ···· 53
그림 18. 두 집단(SE, SI)의 RT와 MT ····· 54
그림 19. 적응 1구간에서의 집단 SE와 SI의 HA ····· 56
그림 20. SE single-subject의 적응 1구간 과제 수행 변화 ····· 56
그림 21. SI single-subject의 적응 1구간 과제 수행 변화 ····· 57
그림 22. 적응 1구간(last)과 탈적응 1구간의 수행 양상 ····· 58
그림 23. SE와 SI의 탈적응 1구간의 수행 변화 ····· 58
그림 24. 적응 2구간의 집단 SE와 SI의 RT ····· 59
그림 25. 적응 2구간의 SE, SI의 DE ····· 60

그림 26. 적응 2구간의 SE, SI의 HA ····· 60
그림 27. 적응 1, 2구간의 SE와 SI 집단의 RT ····· 61
그림 28. 적응 1, 2구간의 SE와 SI 집단의 MS ····· 62
그림 29. SE와 SI 집단의 RT 변화 ····· 64
그림 30. 탈적응 2구간의 SE와 SI 집단의 MT ····· 65
그림 31. 탈적응 2구간의 SE와 SI 집단의 HA ····· 66
그림 32. SE: single-subject.16 적응 2 (initial-last) & 탈적응 2 (initial-last) · 67
그림 33. SI: single-subject.19 적응 2 (initial-last) & 탈적응 2 (initial-last) · 67
그림 34. 지수 함수를 활용한 각 집단의 single-subject의 적응지수 (왼쪽:SE, 오른쪽:SI)68
그림 35. 집단 SE와 SI의 기준선과 탈적응2 구간의 DE 비교 ····· 69
그림 36. 집단 간 시기별(2수준) RT 결과 ····· 73
그림 37. 집단 간 시기별(initial-last) DE 결과 ····· 74
그림 38. 집단 간 시기별(initial-last) HA 결과 ····· 75
그림 39. 집단별 적응1 구간(last)와 탈적응1 구간 간(all) 비교 ····· 77
그림 40. AE, CE, SE(왼쪽부터) 집단의 탈적응 구간 수행의 양상 ·· 77
그림 41. 집단 AE, CE, SE의 적응2 구간의 수행 변화 ····· 79
그림 42. 적응2 구간의 집단 간 수행 정확도 비교(ED) ····· 80
그림 43. 적응 2구간의 집단 간 HA 비교 ····· 80
그림 44. 적응 2구간의 집단 간 시기에 따른 MS 비교 ····· 81
그림 45. 집단 별 적응 1구간(initial-last) 2구간(initial-last)의 RT ····· 83
그림 46. 집단 별 적응 1구간(initial-last) 2구간(initial-last)의 MT ····· 84
그림 47. 집단별 적응 1구간(initial-last) 2구간(initial-last)의 DE ····· 84
그림 48. 집단별 적응 1, 2구간의 HA ····· 85
그림 49. 집단별 시기에 따른 탈적응 정도 (RT, MT, MS) ····· 87
그림 50. 집단별 시기에 따른 탈적응 정도(RT, MT, MS) ····· 88
그림 51. 기준선 검사와 탈적응 구간 DE 비교 ····· 89
그림 52 적응 1구간의 집단 간 시기별 HA 변화 양상 ····· 93

그림 53 적응 1구간의 집단 간 시기별 DE 변화 양상 ····· 93
그림 54 적응 1구간의 집단 간 시기별 MS 변화 양상 ····· 93
그림 55. 왼손 오른손의 전이 양상(RT) ····· 94
그림 56. 적응 1구간에 따른 탈적응 1구간의 수행 양상 ····· 95
그림 57. 탈적응 1구간의 오른손 왼손의 DE ····· 96
그림 58. 집단의 왼손 적응 2구간의 DE와 HA ····· 97
그림 59. 적응 1구간 후기에서 집단별 참여자에게 가해지는 외력 및 저항력 · 105

Ⅰ. 서론

1. 연구의 필요성

운동학습(motor learning)은 개인의 영구적인 능력의 변화를 가져오는 연습이나 경험과 관련된 일련의 내적 과정이다(Schmidt & Lee, 2005). 운동을 배운다는 것은 단지 반복적인 연습을 통해 나타나는 일반적인 능력의 변화뿐만 아니라 신체기능에 대한 총체적인 이해가 있어야 한다. 다양한 감각 정보를 감지하고 처리하는 것부터 행동의 의도에 이르기까지 복잡한 과정을 통해 움직임을 생성하기 때문에 운동학습을 이해한다는 것은 감각 및 지각의 기능, 움직임의 의도에 부합하는 동작의 생성과 협응(coordination) 등 복합적 기능을 모두 아는 것이라 할 수 있겠다(김선진, 2015).

초기 운동학습의 연구자들은 이러한 복잡한 인간 행동을 설명하기 위해 신경학적 측면을 기반으로 한 반사 이론을 제안하였다. 반사 이론은 환경으로부터 오는 감각 정보가 운동 행동을 위한 자극(stimulus)이 되고, 이는 다시 반사회로(reflex circuit)를 형성하여 복잡한 인간의 움직임이 유발된다고 가정한다. 그러나 개방회로 이론(open-loop theory)을 주장하는 학자들이 감각 수용기의 정보전달을 해주는 뇌 신경회로가 손상된 환자도 감각 피드백 없이 운동 수행을 할 수 있다는 다양한 연구결과를 제시하며, 반사 이론은 복잡한 인간 행동을 모두 설명하기에는 제한적이라 보고하였다(Lashley, 1917).

이에 운동학습 연구자의 철학적 관점에 따라 단순히 자극-반응인 외부적인 요소보다 마음, 정신, 의식과 같은 내적인 요소에 관심을 두게 되면서, 인간이 자극 정보를 의도적으로 받아들이고, 그 정보를 어떻게 처리하는가에 대한 정보처리 관점(information processing approach)의 연구가 진행되었다. 하지만 곧, 수많은 역학적 자유도를 갖는 인간의 운동 행동을 단지 내적 표상으로만 모두 설명할 수 없다는 문제가 제기되면서 내·

외적 요소를 고려하여 운동체계를 설명한 다이내믹 시스템 관점(dynamic system approach)과 함께, 인간은 하나의 유기체로서 과제를 지각하고, 이에 속한 환경의 특성에 따라 움직임을 일으킨다고 보는 생태학적 관점(ecological approach)의 운동학습 연구가 진행되었다.

두 관점의 운동학습 연구는 운동학습 과정에서 나타나는 자세 변화와 학습자가 사용하는 학습 전략에 관심을 둔 연구이다(Newell & McDonald, 1992). McDonald 등(1995)은 두 관점을 토대로, 탐색전략(search strategy)에 근거한 운동학습 이론을 제시하였으며, 이 전략은 환경과 과제의 특성에 부합하는 지각정보와 운동정보의 상호 순환 체계가 형성되는 지각-운동 활동영역(perceptual-motor workspace)에서 이루어진다고 하였다. 그러나, 전통적인 운동학습의 행동주의 관점 연구는 운동기술 능력을 향상시킬 수 있는 운동학적 성격에만 초점이 맞춰져 있어 많은 지각과 운동 관계의 인지적 역할 부분이 빠져있다.

이러한 문제점이 제기되면서, 운동학습 분야에서는 인지신경과학과의 접목을 통해 인지 전략(cognitive strategy)이 다양한 감각지각 운동학습에 미치는 영향을 직접 평가하고자 하였고, 최근에는 주어진 환경과 과제의 변화에 대해 적절한 인지 전략을 유도할 수 있는 지각운동 연구가 주를 이뤄 연구되고 있다(Gillespie, Ghasemi, & Freudenberg, 2016; Popa & Ebner, 2019). 이러한 연구의 주된 과제는 시지각 운동 적응(학습)으로 학습자가 목표한 바를 달성하기 위해 시각적 왜곡에 의한 감각 불일치를 계속해서 수정 반복하는 학습 과제이다. 이러한 과제의 수행과정에서 학습자는 스스로 의식적 주의를 기울여 과제를 수행하기도 하고, 명확한 목표에 대한 의식적 주의 없이 변화된 환경에 능동적으로 문제를 해결하기도 한다. 보다 구체적으로, 학습자는 과제의 특정 목표에 대한 규칙을 찾기 위해 의식적인 명시적 전략(explicit strategy)을 적극 활용하기도 하고, 학습하고자 하는 의도와 무관하며 획득한 지식을 자각하지 못하지만, 무의식적 수준의 암묵적 전략(implicit strategy)을 활용하기도 한다.

전통적인 운동학습의 연구는 학습자가 더욱 효율적인 명시적 전략을

활용할 수 있도록 특정 과학의 원리나 수학 공식의 형태로서 객관적이고, 효과적인 피드백을 제공해 주는 것에 집중하였다. 그러나, 인간 행동의 많은 측면이 의식하 수준에서 암묵적으로 처리된다는 증거들이 입증되면서(Libet, 1985; Soon et al., 2008), 암묵적 전략 사용을 유도한 운동학습의 연구도 진행되었다.

인간은 새로운 기술을 습득하기 위해 명시적 전략과 암묵적 전략 모두 사용하는 방법을 배운다. 예를 들어, 골프를 하는 방법을 배울 때 손과 눈의 협응을 이룰 수 있는 암묵적인 운동기술과 강풍이나 필드의 기타 외적 요인에 따라 움직임을 계획하는 명시적 전략을 배울 수 있다. 이에 Maters(1992)는 최초로 운동상황에서의 암묵 및 명시적 학습 전략을 제공하고, 두 학습 전략의 효과를 비교 검증하였다. 그 결과, 암묵적 전략이 빠른 운동상황에서 더욱 효과적으로 발휘되고, 자동화된 기술 수준에서 적은 섭동을 나타냈다. 이렇듯, 대부분 연구결과는 암묵적 전략의 학습 효과가 명시적 전략의 학습보다 더욱 긍정적인 효과를 미친다는 것이었다. 그러나 이후, 후속 연구를 통해 시간이 지속될수록 암묵적 학습과 명시적 학습의 뚜렷한 효과 차이는 나타나지 않았고, 뇌 손상으로 인해 동작 체계가 불완전하거나 저하 됐을 경우, 명시적 학습이 수행에 더욱 긍정적으로 작용할 수 있다고 하였다. 이처럼 운동기술 습득에서 두 학습의 유용성을 입증한 연구들이 많이 이루어졌으나, 학자들 간의 두 학습 전략의 효과에 대한 이견은 여전히 남아있는 상태이다(Beek, 2000; Bright & Freeman, 1998; Jackson, 2003).

Poh등(2016)은 두 학습 전략을 분리된 양식으로써 구분하지 않고, 상호작용적 의미의 접근을 시도하였다. 암묵적 학습과 명시적 학습을 동시에 관찰할 수 있고 지속적인 과정을 관찰할 수 있는 감각 지각 운동학습 패러다임 과제를 활용하여, 암묵 및 명시적 학습을 수행하는데 소요된 시간에 현저한 차이가 있음을 밝혀냈다. 수행 오류에 의한 느린 요소(slow component)의 암묵적 학습은 점차 빠른 속도로 오류를 극복하며 명시적 학습의 빠른 요소(fast component)를 가지게 되고, 명시적 학습은 지속적

인 오류 피드백(느린)이 명시적 학습의 오류 진폭을 점점 줄여 암묵적 학습의 기여도를 높인 것을 발견하였다. 이처럼 한 운동 수행 안에 두 인지 처리 과정은 완전하게 구분될 수 없는 제한점이 있으므로, 지도자는 두 학습 방법의 우열적 분리보다는 환경과의 상호작용 속에서 최적화된 인지 전략 학습을 제공할 필요가 있다.

앞서 언급된 대부분의 지각운동 적응과제는 시각의 왜곡이 적용되어 인간의 움직임을 살펴본 연구이다. 인간은 다양한 감각기관으로부터 감각 정보를 전달받아 정보처리가 이뤄지며, 이중 시각은 인간이 의식적으로 선택한 결과로 반응이 이뤄지고, 고유수용감각은 의식적인 과정 없이도 일어날 수 있다. 이처럼, 서로 다른 메커니즘에 의해 작동되는 감각운동시스템은 학습의 과정에서도 많은 수행역할의 차이를 보인다. 예를 들어, 도달과제(reaching task)에서 시각은 손의 움직임 방향과 범위 조절에 쓰이고, 운동감각은 최종적 손 위치를 제어하는데 관여한다(Sober & Sabes, 2003). 이는 한 동작을 수행하는 데 필요한 감각이 과제의 목적에 따라 서로 다른 역할을 보이고, 적응과정을 거친다는 것을 알 수 있다. 또한, 신경생리학적 기전에 의해 밝혀진 바로, 제공된 감각 피드백의 유형에 따라 각 감각은 소뇌에서 독립적으로 처리된다고 보고 있으며(Rabe et al., 2009), Krakauer(1999)등은 외력이 주어진 감각 운동 적응과제는 시각 피드백의 방해를 받지 않아, 두 감각(시각과 고유수용감각) 시스템은 서로 분리된 신경 메커니즘에 의해 작동된다고 보고하였다.

최근 운동학습 메커니즘을 규명하고자 하는 많은 연구에서 소뇌(cerebellum)가 학습 기전을 담당하고, 운동 명령의 감각 귀결을 예측하는데 중요한 역할을 한다는 것이 보고 되었다(Wolpert et al., 1998). 인간의 움직임은 예측된 감각 결과와 실제 감각 결과 사이의 불일치가 유발될 때 내부 동작 시스템을 통해 수정과정을 거처 과제에 적응한다고 알려져 있다. Leow(2017)등은 이때 소뇌가 명시적 과정(시각적 피드백의 회전에 대응하기 위한 의도적 조준)과 오류 중심의 암묵적 감각 운동시스템을 모두 반영하고 있다고 보고하였으나, 여전히 지각운동 적응과제의 명시

적 및 암묵적 과정에 대한 소뇌의 기여는 아직 불분명하다고 보고한다. 한편, 몇몇 연구들에서는 소뇌가 반복적 자극으로 형성된 반사적이고 자동적인 무의식적의 암묵적 기억을 담당한다고 본다(Miall et al., 2000; Miall & Reckess, 2002; Nowak et al., 2007). 또한, 소뇌 병변 환자를 대상으로 한 임상 시험 결과를 통해, 그들이 스스로 감각 정보의 예측과 실제 움직임 간의 불일치를 극복하지 못하는 암묵적 처리 과정(implicit process)에 특징적인 어려움을 나타내는 것을 발견하였다(Tseng et al, 2007, Butcher et al. 2017). 그러나, Taylor(2010) 등은 소뇌 병변 환자에게 수행의 어려움을 극복할 수 있도록 명시적 목표 전략과 해당 전략을 위한 시각적 단서를 제공하였더니 거의 완벽에 가까운 운동 수행이 가능하다는 것을 확인하며, 소뇌 병변 환자가 명시적인 지시를 통해 움직임을 수정할 수 있으므로 명시적 과정은 소뇌의 역할로 볼 수 없다고 제안하였다.

선행연구를 종합해볼 때, 소뇌는 섭동에 대한 전략적 보상을 구현하지 못하지만, 한편으로는 암묵적 처리 과정이 유도된 과제에서 암묵적 학습을 보상하기 위한 명시적 전략을 구현해내는 것 또한 어렵다는 것을 시사한다.

최근에는 전기적 자극 처치를 이용하여, 뇌의 신경 활동을 조작함으로써 나타나는 수행 양상을 바탕으로 소뇌의 기능적 역할을 규명하는 연구들이 주를 이루고 있다. 그리고, 이와 같은 연구에 사용된 대표적인 도구가 경두개 직류자극(transcranial direct current stimulation; tDCS)과 경두개 자기자극(Transcranial Magnetic Stimulation; TMS)이다. 비침습적 뇌 자극은 특정 뇌 영역에 자극을 선택적으로 가함으로써 일시적으로 해당 뇌 영역의 기능적 역할을 촉진하거나 상실시킬 수 있다. 이에 연구자들은 비침습적으로 인간의 뇌를 자극해 운동 피질의 뇌 재조직에 변화를 불러일으키고, 손상된 운동기능을 보상하는 하나의 재활 책략으로 활발히 사용하고 있다(Kami et al., 1995; Petersen et al., 1998; Schweizermd et al., 2001). 다만 몇몇 선행연구들에 의하면 시지각 운동과제에서의 소뇌 자극은 안구운동(saccadic eye movement)의 속도를 변화시켜 과제 수행에

오히려 방해될 수 있다고 하였으며(Miall & Christensen, 2004; Ohtsuka & Enoki, 1998), 전운동영역(premotor cortex)과 후두정엽의 전기자극 또한 일시적으로 안구의 움직임과 수정과정에 영향을 미치는 것으로 나타났다(Lee & Van Donkelaar, 2002). 이처럼 무조건적인 전기자극 처치는 오히려 학습에 방해될 수 있고, 시지각 적응과제와 같이 시각이 주된 피드백인 감각 운동과제에서는 더욱이 적절히 활용되기 어렵다는 것을 시사한다.

따라서 본 연구에서는 지각운동 기술 습득에서 나타나는 암묵 및 명시적 학습에 따른 지각운동 수행의 양상을 살펴보고, ctDCS(cerebellum transcranial direct current stimulation)의 극성에 따른 지각운동 수행 양상을 비교 분석하여 소뇌의 기능적 역할을 탐색하고자 하였다. 이를 통해 기존 단일 과제에 대한 비침습적 뇌 자극 효과의 유무 차원 연구를 넘어, 다양한 인지적 차원의 운동학습에 제공된 비침습적 뇌 자극의 효과를 살펴볼 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 이는 운동기술 습득을 위한 특화 전략 및 소뇌 환자들의 대안적 운동 전략(alternative motor strategies) 방법을 발전시키고, 운동 신경 재활 프로그램을 설계하기 위한 하나의 선행연구가 될 수 있을 것이다.

2. 연구목적

본 연구는 지각운동과제에서 인지 전략 학습에 기반한 두 조건, 암묵적 및 명시적 유도전략 학습(적응)이 운동학습 과정에 미치는 영향들을 살펴보고, 비침습적 뇌 자극의 극성에 따른 암묵 및 명시적 학습 과정을 정량적으로 측정하여 운동학습의 양상을 살펴보는 것에 그 목적이 있다. 이를 위해, 외력(external force-field)을 활용한 목표물을 향한 팔 뻗기(reaching) 과제 수행에서 암묵적/명시적 유도전략 학습 별 참여자의 수행 변화를 비교 분석하고, 비침습적 소뇌 자극의 극성에 따른 명시적 유도 학습의 수행 양상 변화를 살펴보고자 한다.

실험 1. 외력을 활용한 지각운동과제에서 암묵적/명시적 유도 학습 전략에 따른 참여자의 수행 변화를 살펴본다.

암묵 및 명시적 정보에 따른 인지 전략 학습의 차이가 외력을 활용한 팔 뻗기 과제 수행에 미치는 영향과 학습 효과를 검증한다.

실험 2. 외력을 활용한 지각운동과제에서 소뇌의 비침습적 뇌 자극이 명시적 유도 학습 수행에 미치는 영향을 살펴본다.

비침습적 소뇌 자극을 활용한 이전 연구는 소뇌가 감각 운동 적응의 역할을 한다는 것은 밝혀냈지만, 적응 중에 발생하는 명시적 과정과 암묵적 과정을 분리하지 않아, 소뇌의 역할이 불분명했다. 따라서 본 연구는 명시적 학습이 유도될 때, ctDCS 극성에 따른 수행 양상 비교를 통해 소뇌의 역할을 탐색해보고자 한다.

실험 3. 비침습 뇌 자극에 따른 명시적 학습의 왼손 전이 효과를 검증한다.

비침습적 뇌 자극의 극성별 명시적 유도전략 학습이 지각운동 수행의 전이에 미치는 영향을 살펴본다.

3. 연구가설

가설 1. 명시적 유도 학습 전략과 암묵적 유도 학습 전략에 따른 지각운동과제의 수행 변화는 다를 것이다.

1) 명시적 유도 학습 전략은 수행과정에서 더욱 빠른 적응(학습) 양상을 나타낼 것이다.
2) 명시적 유도 학습 전략은 수행과정에서 느린 반응시간을 나타내며, 느린 운동시간을 가질 것이다.
3) 암묵적 유도 학습 전략은 학습의 공고화가 더욱 강할 것이다.

가설 2. 비침습적 뇌 자극은 감각운동 적응의 속도 및 정도에 영향을 미칠 것이다.

1) 소뇌의 경두개 직류 전기자극의 양극(anode)은 명시적 지시를 활용한 손 뻗기 과제에서 운동 수행 초기 빠른 오류 감소를 나타낼 것이다.
2) 소뇌의 경두개 직류 전기자극의 음극(cathode)은 명시적 지시를 활용한 손 뻗기 과제에서 운동 수행 초기 느린 오류 감소세를 보이거나, 수행의 변화가 적을 것이다.
3) 소뇌의 경두개 직류 전기자극의 양극(anode)은 명시적 지시를 활용한 손 뻗기 과제에서 습득된 운동 적응의 유지 및 전이에 효과를 나타낼 것이다.
4) 소뇌의 경두개 직류 전기자극의 음극(cathode)은 명시적 지시를 활용한 손 뻗기 과제에서 습득된 운동 적응의 유지 및 전이에 양극을 처지한 집단과 다른 양상을 나타낼 것이다.

4. 용어의 정의

본 연구에서 사용된 용어는 다음과 같이 정의된다.

용어 1. 암묵적 학습(implicit learning)

암묵적 학습은 학습하고자 하는 의도와 무관하고, 획득한 지식을 자각하지 못하는 지식 획득의 과정으로(이순묵과 차경호, 2000) 의식적인 노력 없이 자동적인 처리 과정을 통해 이루어지는 학습을 암묵적 학습이라 한다. 본 연구에서는 지각운동 수행을 빠른 시간(300ms)안에 출발하도록 하여 의식적 자각을 최소화한 운동 수행(학습)을 하도록 유도하였다.

용어 2. 명시적 학습(explicit learning)

명시적 학습은 과제에 대하여 시각적, 언어적으로 제공되는 지식이 의식적인 자각으로 구체적인 목표 지식을 습득하고 문제를 해결하는 방법의 학습이다(Berry et al., 1993). 본 연구에서는 참여자가 외부 섭동에 대해 미리 운동 명령을 계산하여 인지 전략을 적극적으로 사용할 수 있도록 1050ms의 충분한 시간이 제공되고 섭동에 대한 정보를 미리 명시적으로 제공하였다.

용어 3. 비침습 뇌자극(non-invasive brain stimulation)

비침습 뇌자극 기법(non-invasive brain stimulation technique)은 약한 전류를 뇌에 전달하여 대뇌 피질의 활성도를 인위적으로 변화시키는 것으로 알려져 있다. 자극의 극성에 따라 대뇌 신경세포들을 활성화 또는 비활성화할 수 있으며, 이중 양극 자극(anodal tDCS)은 일반적으로 신경세포의 막 전위(membrane potential)를 활성화해 대뇌 피질의 활성도를 향상시키고, 음극 자극(cathodal tDCS)은 반대로 감소시킨다. 이를 이용하여 본 연구에서는 양극과 음극을 소뇌에 적용하여 지각운동 수행의 과정을 살펴보았다.

용어 4. 지각운동 적응과제(perceptual motor adaptation task)

적응과제는 일반적으로 한 시행에서 다음 시행으로 넘어갈 때 나타나는 감각적 오류를 반복적으로 움직임 수정 또는 학습하는 종류의 과제를 말한다. 본 연구의 지각운동 적응과제를 통해 감각의 중요한 자극에 대한 지각적 식별을 하고 적절한 운동 반응을 생성하는 적응과정을 살펴볼 수 있다.

Ⅱ. 이론적 배경

1. 운동학습과 운동제어의 이론적 기반

우리가 한 동작을 실행하려면 목표 또는 원하는 동작의 결과를 결정해야 하고, 동작을 결정짓는 매개변수를 고려하여 실행할 필요가 있다. 골프에서 아이언 샷으로 홀컵에 닿을 거리가 물리적으로 가능할 때, 골퍼는 홀컵을 목표로 두고 볼을 바로 넣을 것인지 해저드를 피해 두 번에 나눠 갈 것인지를 결정하게 된다. 이와 같은 접근 방식이 정해지면 스윙 궤도의 크기, 근육의 힘, 호흡 등 목표를 달성하기 위한 매개변수의 적절한 조절을 한다. 이처럼 하나의 운동기술을 구현하기 위해 인간은 복잡한 내적 과정을 거치게 되며, 이러한 복잡한 인간 행동의 기전을 설명하기 위한 다양한 이론들이 제기되어 왔다.

1) 정보처리와 계산론적 관점

인간 운동 행동의 내적 과정에 중점을 둔 정보처리(information processing) 관점은 인간을 하나의 컴퓨터 소프트웨어(software)로 가정하고 유입된 정보를 수리적으로 표현하는 접근 중 하나이다. 정보처리 관점에서 가장 먼저 제시된 Adams(1971)의 폐쇄회로 이론(closed-loop theory)은 인간의 움직임 조절은 기억 속에 저장된 모든 동작에 대한 정보, 즉 참조 준거(reference of correctness)와 실제 동작 간의 오차를 수정하는 과정으로 발생한다고 본다. 이처럼 신경 체계에 의한 움직임 제어 이론은 동물과 사람을 대상으로 감각 정보(구심성 신경)의 전달 경로를 차단한 실험을 통해 중요한 한계점을 드러냈다. 먼저, Wilson(1961)은 메뚜기의 구심성 신경을 차단하고, 머리 부위에 자극을 가하였더니 메뚜기의 날개 운동의 유형이 이전과 같았고, Provins(1958)은 인간의 구심성 신경을 차단하여도

운동의 정확성이 감소할 뿐 운동능력에는 이상이 없다고 보고하였다. 이처럼, 감각기관으로부터 수집된 피드백 정보가 차단된 경우에도 정상적으로 운동이 발생할 수 있다는 결과가 제시되며, 피드백 정보가 운동의 정확성을 증가시키는 데에는 중요한 역할을 하지만 필요한 기제는 아니라는 것을 시사하고 있다. 그뿐만 아니라, 폐쇄회로 이론은 오류를 탐지하고 수정하는 데 걸리는 시간이, 빠른 동작을 설명하기에는 적합하지 못하여 운동의 자동 제어 체계를 설명하기에는 문제점이 있다고 지적하였다.

이러한 문제점이 제기되면서, 대안적 이론으로 개방회로 이론(open-loop theory)을 제시하였다. 인간의 모든 행동은 상위의 대뇌피질에 저장된 동작에 대한 프로그램에 의해 생성된다는 이론이다. 개방회로 이론은 피드백에 크게 관여하지 않아 빠른 동작을 설명하기에는 적합하였으나, 인간의 수없이 많은 자유도의 경우의 수를 모두 한정된 기억용량에 저장해야 하는 저장 문제(storage problem)에 대한 의문점이 제기되었다.

이후 폐쇄회로 이론과 개방 회로의 제한점을 극복하기 위해 Schmidt(1975)는 인간 운동 행동을 융통적으로 설명할 수 있는 일반화된 운동프로그램(generalized motor program)을 근거로 도식이론(schema theory)을 발전시켰고, 현재 운동과 유사한 이전의 운동 경험을 근거로 새로운 운동을 계획하는 회상 도식 이론(recall theory)과 피드백을 통해 잘못된 움직임을 평가하고 수정하는 재인도식(recognition schema) 이론을 제시하였다. 그러나, 이러한 도식이론도 중력이나, 근육의 피로 등 환경과 동작 시스템의 변화 요소를 모두 고려하지 못한 문제점이 제기되고 있다.

앞서 언급한 바와 같이, 정보처리 및 실험적 접근에 의하면 인간의 움직임은 물리학적 법칙과 중추신경계의 처리 과정을 거쳐 생겨난다는 것이다. Smith(2002)가 계산론적 관점이 때로는 정보처리로 해석된다고 한 것처럼, 의미에 대해 확립되지 않은 모호한 관계로 두고 있다. 정보처리의 개념은 유기체가 환경에서 생태학적으로 관련된 사건을 추론하고 그에 따라 행동을 생성하는 방법을 이해하는 것이라면, 계산론적 개념은

“디지털 계산‘ 또는 ’아날로그 계산’처럼 독립적으로 정의된 계산 개념보다는 ’신경 계산’으로 이론을 찾는 개념이라 할 수 있다(Piccinini & Scarantino, 2010). 인간의 운동 행동을 정보처리 관점에서 해석하고자 하지만 실질적으로 ‘정보’가 계산으로 처리되는지에 대한 여부는 여전히 알 수 없다.

운동제어에 관한 계산론적 관점의 학자들은 인간의 감각 신호와 운동 명령과의 관계에 근본적인 관심을 두고 있으며, 둘 간에 이르는 변환과정을 어떻게 내적으로 표상하고 있는지에 대한 문제를 다루고 있다(Bays & Wolpert, 2006). 그리고, 이러한 문제를 해결하기 위해 운동 행동에서의 추상적인 진술들을 계산론적 측면에서 보다 직관적이고 명료하게 잘 정의된 ‘사고의 언어’로 접근한다(Fordor, 1975).

최근의 계산론적 관점의 연구들에 의하면 감각 정보를 바탕으로 한 운동 명령의 처리 과정뿐만 아니라 운동 명령에 따라 나타나게 될 수행의 감각 귀결을 예측하는 처리 과정까지 내적으로 표상한다고 보고하였다(Franklin & Wolpert, 2011). 이러한 처리 과정을 모사하는 시스템을 포워드 인터널 모델(forward internal model)로 알려져 있으며, 이는 신체와 세계의 상태를 예측하고, 동작과 그 동작의 귀결로 나타나는 것들의 처리 과정을 인과적 관계로 모델링하는 계산적 기능을 담당한다고 본다. 포워드 인터널 모델과 반대의 역할을 수행하는 인버스 인터널 모델(inverse internal model)은 요구되는 운동 결과를 일으키기 위해 중추 운동 명령을 추출해 낸다. 이 모델을 주장하는 계산론적 접근의 학자들은 포워드 모델(forward model)과 인버스 모델(inverse model)의 두 작동 시스템이 독립적으로 또는 상호 조합 작용하에 인간의 움직임이 생성된다고 본다(Wolpert & Kawato, 1998). 먼저, 인간은 감각 피드백 컨트롤러를 통해 현재 상태와 의도된 동작이 주어지면 포워드 모델을 통해 미래 상태를 예측할 수 있는 시스템이 작동되고, 미래 원하는 상태가 일어나면 해당 상태를 가져오는데 필요한 모터 명령을 생성하는 시스템으로 원하는 목표를 달성하는데 필요한 운동 명령을 제공하는 인버스 모델의 작동으로 움직임을 설명하고 있다. 다양한 학문 분야에서 인간의 움직임 제어의

핵심적인 행동 모델로 인식되면서 다양한 환경과 과제에 적용되어 기전을 밝히고, 이를 바탕으로 움직임의 효율성을 증대시키고 있다.

2) 다이내믹과 생태학적 관점

1980년대에 들어서는 수많은 자유도를 가진 인간의 복잡한 운동 행동을 기억 표상(representation)으로만 모두 설명하기에는 문제점이 많다는 지적이 제기되면서, Bernstein(1966)의 자유도와 관련한 신체의 역학적 특성이 움직임에 어떠한 영향을 미치는지에 관한 관심을 시작으로 이전의 운동제어 이론과는 다른 시각의 인간 운동 행동에 접근하기 시작했다. 이에 더불어 Newell(1986)은 인간의 복잡한 움직임을 신경 체계의 조절에만 인간의 움직임과 관련된 제반 의문점은 환경(environment), 과제(task), 유기체(organism)의 제한요소 속에서 자기조직 원리와 비선형성 원리에 따라 인간의 운동이 생성되고 변화한다고 하였다. 이처럼 인간의 운동 행동은 기존의 이론에서 제시한 운동프로그램과 같은 내적 기억 표상을 통해 발생하는 것이 아니라 환경, 유기체, 과제와 같은 제한요소의 변화에 따라 새로운 조건에 맞는 운동 형태로 갑작스럽게 전환되는 상변이 현상(phase transition)으로 발생하며, 이러한 현상을 통해 인간의 움직임의 안정성과 갑작스러운 변화의 상태를 논리적으로 설명 가능한 이론으로 보고 있다.

Bernstein(1966)의 문제 제기 이후 다이내믹 시스템 이론과 함께 인간 운동 행동에 대해 새롭게 접근하고자 한 생태학적 관점은 인간이 유용한 정보를 탐색하고, 그 정보를 탐색하는 과정에서 드러나는 정보의 의미가 운동 행동을 유발한다고 본다(Gibson, 1950). 다시 말해, 우리는 지각한 물체와 자신 그리고 처한 환경의 상호 관계 속에서 동작에 대한 지각이 이루어지고, 그에 따라 동작이 이루어진다는 것이다. 생태학적 관점에서의 운동 행동은 생활환경으로부터 직·간접적인 정보를 받아 지각하며 행위가 만들어진다고 본다. 각자의 주어진 환경의 행동 무대는 제각기 다르며 지속적인 특성을 보여, 인간이 환경에 맞추어 행동하도록 강요되기

때문에 운동 행동은 그 환경에 따라 달라진다고 보고 있다.

이러한 생태학적 접근에서의 정보는 환경의 특성으로서 인간의 움직임을 일으키는 물리적 정보가 인간이 환경과의 상호작용을 통해 살아가기 위한 중요한 원인이 되는 요소이다. 이러한 정보는 시각, 촉각, 후각, 청각 등의 감각기관을 통해 주위 환경의 모든 물체, 유기체, 그리고 사건에 대한 정보를 습득할 수 있다. 예를 들어, 아이의 경우, 태어나서부터 기고 걷기까지 신체 발달과정을 거쳐 외부로부터 오는 자극을 통해 정보를 전달받아 환경에 맞는 행동을 이루게 되며, 반복된 학습을 통해 더욱 정교하게 변해가는 과정을 겪게 된다. 처음 계단을 오를 때 아이는 자신의 신체에 맞는 다리와 손의 위치를 조정하여 기어 올라가게 된다. 환경에서 들어오는 특별한 시각, 촉각 감각기관을 통해 필요한 반응을 취하게 되어, 결국 자신이 원하는 행동을 취하게 되는 것이다.

2. 운동학습과 인지과정

Shumway-cook 등(2007)은 개인(individual) 안에서 동작(action), 지각(perception), 인지(cognitive)를 통합적으로 설명 가능해야 한다고 하였다. 이는 인간의 행동 그 자체는 개인이 의도한 움직임(과제 수행)과 환경으로부터 제공되는 수많은 정보와 상호 관계 속에서 일어나고 있음을 알 수 있다. 따라서 인간이 다양하고 시시각각 변화하는 환경에 조화롭게 적응해야만 효율적인 움직임을 생성할 수 있으며, 이러한 효율적인 움직임을 극대화하기 위해 인간 운동 행동의 신경학적 원리와 구조를 인식하는 것이 매우 중요하다(Schmidt & Lee, 2013).

1) 의식과 무의식(conscious and unconscious)

인간의 움직임은 예로부터 우리의 뇌가 생각하고 실천하는 것에 기반하

여 생성되는 것으로 보았다. 즉, 자신의 의지대로 매 순간 움직임을 통제하여 원하는 움직임을 달성할 수 있다고 본다. 그러나 실제로 이러한 것에 대한 우리의 믿음은 많은 착각에 불과하다는 것이 최근의 연구를 통해 밝혀지고 있으며, Soon(2008)등은 인간 움직임의 많은 측면이 무의식적 수준에서 처리되고 있다고 주장한다. 그 예로, Milner와 Goodale(2006)는 뇌 손상 환자를 대상으로 한 일련의 연구를 통해 의식적인 경험 없이도 인간의 동작이 충분히 이루어질 수 있음을 확인하였다. 시각적 자극을 식별하고 구별할 수 없는 D.F. 환자는 언어적으로 이 물체가 무엇인지 설명할 수 없지만, 그 물체를 실제로 다루는 운동과제는 어려움 없이 수행 가능하다는 것을 알게 되었다. 또 다른 예로 우리가 물을 마실 때 컵을 입으로 가져와 물을 마시게 되는데 이때 느끼는 시원한 물의 상태는 나의 몸을 통해, 나의 감각기관을 통해서 전달된 정보들을 바탕으로 우리가 의식한다. 따라서 이러한 의식에 의한 움직임의 결과는 감각을 통해 지각한 것임을 알 수 있다.

Dehaene 등(2006)은 인간의 의식 상태를 역하 상태(subliminal state), 전의식 상태(preconscious state), 의식 상태(concious state)로 구분하였다. 먼저 의식 상태는 강한 자극으로 인한 하향적 주의(top-down attention)를 통해 의식적으로 인지된 상태를 말하는 것이며, 의식 상태보다는 덜 강한 자극을 받아 자극에 대한 보고가 불가능한 상태를 전의식 상태로 보았다. 마지막으로 역하 상태는 감각자극이 약하여 상위처리 단계에서 정보처리가 일어나지 않는 상태를 말한다. 이처럼, 의식의 구분 자체가 겉으로 드러나지 않고, 스스로 인지조차 하지 못해 의식에 관한 연구는 더욱 어려운 실정이다. 이에 대한 연구자의 노력은 인간 행동에 대한 현상들의 변화를 관찰하며 무의식에 관한 연구를 하는 것이다. 무의식은 크게 두 갈래의 연구방법으로 나뉘어 연구된다. 먼저, 무의식을 조작하는 방법에 관한 연구와 무의식을 나타내는 현상을 통한 연구방법이 있다. 무의식을 조작하는 방법에는 점화(priming)와 같이 최근 어떤 자극의 노출로 인하여 단어나 대상들의 자극이 더욱 잘 생각나게 만드는 방법이 있다

(Dehaene et al., 2006). 예를 들어, 운동과 관련된 공, 테니스, 라켓 등의 단어를 참여자에게 보여준 후 제시된 단어의 유무를 가리게 하면 제시되지 않았던 '셔틀콕'도 본 적이 있다고 답한다. 이는 '운동'이라는 단어에 대해 점화가 일어나 오기억을 형성하기 때문이다. 다음 무의식을 나타내는 현상을 통한 연구방법에는 암묵적 학습(implicit learning)과 같이 행동에서 나타나는 현상 중에 겉으로 드러난 명시적 지시와 어떤 의도 없이 일어난 현상을 관찰하는 연구가 있다.

2) 운동학습과 기억체계

행동주의 심리학은 기억이나 지식표상과 관련된 문제보다는 학습에 중점을 둔 연구주의였다. 이런 행동주의 연구에 반발하여 출발한 인지과학은 단순 기억의 과정과 지식표상 보다 적응적이고 융통성 있는 시스템을 구축하면서 학습에 관한 연구가 진행되기 시작했다. 특히 인지신경과학적 접근의 연구는 학습과 기억이 공통된 신경적 기반에 있음을 주장하고, 행동주의 심리학의 기억체계 모형에서 드러나는 학습의 과정을 암묵적 기억의 정보처리 개념으로 받아들여 기억-학습의 틀을 제시하였다(이정모, 2009).

기억은 운동 행동과 경험 속에 반영되는 지속적인 표상으로 정의될 수 있고, 학습은 그러한 표상으로 더욱 강화되어 행동을 발달시킨다. 인간의 운동 행동은 하드웨어(기억구조)가 소프트웨어(처리 과정)를 거처 발생한다고 보는데, 이러한 하드웨어적 기억구조는 지각(perception)되고, 저장(stage)되며, 인출(retrieval) 해내는 형태를 지니고 있고, 정보의 양과 시간에 따라 감각기억, 단기기억, 장기기억으로 나뉜다(Atkinson & Shiffrin, 1971). 먼저 감각기억은 극히 짧은 시간에 기억됐다가 사라지는 기억으로 환경으로부터 일차적인 접촉을 통해 감각기관의 수준에서 이루어진다. 하지만 짧은 시간에 사라진다고 해서 감각의 저장용량이 적은 것은 아니다. 한계 역치 내에 드는 모든 감각자극을 수용할 수 있고, 주의집중을 통해 단기기억으로 전이될 수 있다. 단기기억(short-term memory)은 감

각기억을 통해 들어온 정보를 저장하는 저장고로 감각기억 정보를 모두 다 처리할 수 없으며 필요한 정보만을 수용한다. Miler(1955)는 짧은 시간(단기기억) 내에 기억할 수 있는 기억의 양(momory span)을 측정하기 위해 한 번에 기억할 수 있는 기억의 총량을 시험하였고, 그 결과, 기억할 수 있는 항목은 7±2개 내지로 증명되고 있다. 단기기억에 저장된 정보가 쉽게 사라지는 이유는 연습 되지 않아 자연스럽게 소멸한다는 소멸이론(dacay theory)과 파지 시에 일어나는 제반의 사건들로 인한 망각 때문에 간섭이 일어나는 간섭이론(interference theory)에 의해 설명되고 있다. 단기기억에서 반복되지 않은 정보는 쉽게 잊히지만, 반복을 통해 응고화 과정을 거친 정보는 반영구적인 장기기억으로 전이된다.

장기기억은 우리가 일상생활에서 '기억이 어떠하다'라고 설명할 때의 기억이 보통 장기기억이라고 할 수 있다. 이러한 장기기억의 용량은 현재까지 무제한으로 알려져 있으며, 수많은 연습을 통하여 저장된 정보가 필요할 때 찾아 사용할 수 있다. 장기기억은 크게 서술기억(declarative memory)과 비서술기억(non declarative memory)으로 나뉜다(Squire, 1987).

먼저 서술기억(declarative memory) 또는 명시적 기억(explicit memory)은 비서술과 암묵적 기억과는 다르게 자신이 기억하고 싶어서 기억하는 형태의 기억으로 의식적인 지식 활동으로 서술 가능한 기억이다. 이러한 서술기억을 저장하는 주체는 기저핵과 소뇌(cerebellum)가 아닌 해마(hippocampus) 계통과 편도핵(amygdaloid nucleus) 계통의 양축이 갖는 연결 회로가 관여하는 것으로 알려져 있다. 또한, 이 명시적 기억은 의식이 있는 상태에서 회상할 수 있는 기억으로 또다시 의미 기억(semantic memory)과 일화 기억(episodic memory)으로 나뉜다. 따라서 지식과 알고 있는 사실들이 명시적 기억에 포함되는 것이다. 인간의 의식적 수준의 처리를 통해 기억된 명시적 기억은 '테니스는 상대방의 움직임에 따라 준비해야 한다.'와 같은 객관적 사실이나 관념들에 대해 의식적으로 기억해내는 것이며 이러한 명시적 기억을 통한 언어적 피드백이나 많은 운동학 정보에 관한 지식을 활용한 운동학습을 명시적 운동학습이라 한다.

비서술기억은 무의식적인 반응으로 반복과 연습 때문에 자동화되어 의식 작용 없이 저장된 기억이다. 대부분의 운동은 장기기억과 관련된 뇌 영역이 비서술기억의 형태를 담당하는 부위에 더 근접에 있다고 본다. 이에 Shumway-Cook(2007)은 뇌가 손상된 환자를 통해 서술기억의 형태로 반응하던 환자가 명시적 피드백이 없는 반복 학습과 연습을 통해 암묵적 기억의 형태로 전환된 것을 발견하였고, 이를 통해 암묵적 기억과 운동 학습과의 관련성을 주장하였다.

우리가 악기를 연주하거나 자전거를 탈 때처럼 다음 행동에 대한 의식적인 노력 없이 이어지면 암묵적 기억이 작동하고 있다고 본다. 다시 말해, 자전거를 탈 때처럼 어떠한 의식 없이 스스로 움직여 모든 일이 그냥 저절로 일어난 것 같이 명시적으로 표현할 수 없는 학습의 방식으로 학습되는 것을 암묵적 운동학습으로 보고 있다.

3) 암묵적 학습과 명시적 학습의 설명 기제

① 암묵적 학습(implicit learning)

70년대 이전, 행동 심리학 학자들은 인간의 행동은 복잡한 문제를 명시적 기억을 바탕으로 해결한다는 의견이 상당히 지배적이었으나, 이와 같은 문제가 반드시 명시적 지식에 의존하지 않아도 의사결정을 내리는 것을 발견하기 시작하면서 암묵적 지식이 운동 행동에 미치는 요인에 관해 관심을 두기 시작했다. 이에 인지 심리학자들은 인지 과정을 2가지 차원으로 분류하여 무의식(non- awareness)과 의식(awareness), 절차적 기억과 서술적 기억, 명시적과 암묵적 형태로 나뉘어 설명하고 있다. 암묵적 인지는 개인이 의도하지 않고, 무엇을 인지하였는지 자각하지 못하지만 문제 해결에 있어 영향을 미친 요소이다(Reber, 1992). 인지심리가 발전하면서 운동 행동 연구자들은 암묵적 인지 과정의 중요성에 대해 강조하며, 암묵적 기억(implicit meomry), 암묵적 지식(implicit knowledge), 그리고 암묵적 학습(implicit learning)을 통해 운동 행동을 위한 인지 과정의 역할에 관해 여러 연구를 시도하고자 하였다.

Matstes(1992)는 최초로 인간이 암묵적 지식만으로도 운동기술 습득이 발생할 수 있음을 검증하였다. 그는 골프 초보자에게 운동을 수행하는 동안 이중 과제를 부과함으로써, 명시적 지식 사용을 억제해 암묵적 학습만으로 과제를 수행하도록 하였다. 실험 결과, 그들의 퍼팅 기술이 손상되지 않았고, 수행의 저하 또한 일어나지 않았다. Masters(1992)는 이와 같은 실험을 근거로 재투자 가설(reinvestment hypothesis)을 제안하였다. 그는 덜 명시적인 학습 방법이 더 적은 인지적 간섭을 받아 재투자(reinvestment)를 거치지 않기 때문에 암묵적 학습의 효과가 있다고 주장한다. 여기서 재투자란, 의식적이고 명시적이며, 규칙적인 지식을 이용하여 자신의 동작을 조절하는 것을 말한다. 이처럼, 세세한 동작 메커니즘에 대한 명시적인 정보 없이도 운동학습이 일어날 수 있고, 반대로 이는 암묵적 학습이 일어났음을 뜻하는 바이기도 하다.

암묵적 과정은 작동 기억과는 독립적으로 이루어지기 때문에 나이 및 지능과 관련이 적으나, 관련이 있는 명시적 과정은 나이가 증가함에 따라 쇠퇴한다고 보고하였다(Allen & Reber, 1980). 이처럼 높은 인지 처리를 요구하는 복잡한 운동과제일수록 암묵적 학습의 효과가 더욱 크게 나타나므로(Farrow & Abernethy, 2003; Maxwell et al., 2001;, Shea et al., 2001), 한 맥락에 관한 운동학습이 다른 맥락으로 방해받지 않는 과정의 덜 명시적인 학습 전략을 제공해 주는 것이 필요하다. 이는 Wulf(1999)등의 연구에서도 밝혀진바, 암묵적 학습은 과제의 스트레스가 많고 복잡할 때, 의식적인 명시적 지식보다는 블록화된 암묵적 학습 피드백이 더욱더 효과적임을 나타내었다. 암묵적 학습은 학습자가 동작에 대한 규칙을 스스로 탐색할 기회를 제공함으로써 비의식적 지식을 자발적으로 이용할 수 있게 된다. 예로써 초보 학습자가 테니스를 칠 때 상대방의 동작과 관계된 특성을 통해 볼의 궤적이나 스핀의 양을 암묵적으로 발견하고 운동 행동을 수정하게 된다. 그리고 이런 수행 자체는 그 과제의 특성을 명시적 정보로 사전에 알고 학습하는 것보다 더욱 효과적일 수 있다. 또한, MacMahon와 Masters(2002)는 이처럼 학습된 기술은 시간이 지나도

지속성이 커 암묵적 학습의 효과에 대해 보고하였다.

그러나 기존 대부분의 연구가 암묵적 학습의 수행 결과에만 치중하고 있을 뿐, 결과를 충분히 설명할 수 있는 체계화된 이론적 틀을 형성하거나 암묵적 학습에 대해 새롭게 검증할 만한 실험연구들이 부족한 실정이다. 또한, 암묵적 학습이 명시적 학습보다 효과적이라는 주장을 하기 위해서는 과제의 특수성과 학습자의 수행 수준의 비동질성 또는 신경 심리학적 손상이 발생한 경우의 문제가 고려될 필요성이 있다.

② 명시적 학습(explicit learning)

명시적 학습은 과제에 대하여 시각적, 언어적으로 제공되는 지식이 의식적인 자각에 의해 구체적인 목표 지식을 습득하고 문제를 해결하는 방법의 학습이다. 명시적 학습은 과제 환경에 대한 규칙적인 지식을 획득하기 위하여 의식적으로 끊임없이 주의를 기울여야 하며, 문제 해결을 위하여 다양한 전략을 활용할 수 있다(Berry et al., 1993). 이와 같은 학습은 일반적으로 학습 초기 단계에서 많이 적용되는 방법으로 학습자에게 운동기술 과제에 대한 정보를 명시적 지식으로 제공하고 이를 수행 반복하도록 하면서 수행에 대한 피드백을 제공하는 형식으로 이루어진다. 이때 지도자가 제공하는 명시적 지식은 학습자에게 매우 중요한 정보로 인지적 요구가 많은 학습 초기에 필요로 한다. 또한, 명시적 피드백을 통해 학습자는 적절한 동작을 의도적으로 생성하고 수행하는 과정에서 언어 작업 관련 지식을 증가시키고, 스스로 작업 관련 지식을 습득하기 위해 적극적으로 탐색하는 능력을 기른다. 이를 탐색전략 학습이라고 하며, 적절한 움직임 형태에 대한 능동적 탐색은 명시적 학습을 지원하는 작업 기억으로 뒷받침된다(Maxwell et al., 2000).

전통적인 운동학습의 연구는 새로운 운동기술을 학습하는 학습자에게 운동기술과 관련된 정보를 효과적으로 받아들일 수 있도록 적절한 명시적 지식을 전달하는 법을 고민해왔고, 특히 학습자가 오류를 수정하고 바른 자세를 형성할 수 있도록 운동 수행에 필요한 정보를 제공하는 것

이 중요하다고 보았다. 먼저 학습자가 인식하지 못하는 유용한 정보를 파악하여 전달할 수 있어야 하고, 잘못 인식하고 있는 것을 바로 잡아준다는 측면에서 명시적 정보는 학습 과정에 필수요소로 간주 된다. 이러한 명시적 지식을 통한 학습은 암묵적 지식과 달라 각기 다른 영역과 상황에 쉽게 적용될 수 있는 이점을 가지고 있으나(Dienes & Berry, 1997), 수행과정의 적응이지 적용되어 학습된 것이지는 살펴보아야 할 문제이다.

3. 운동학습과 인지 전략의 다양성

1) 운동학습과 인지 전략과의 관계

최근 들어 운동 수행의 성공 여부는 효과적인 인지 전략 과정의 영향을 받을 수 있다는 것이 보편화하면서 운동 수행에서 인지 처리 과정에 관한 연구가 폭넓게 진행되고 있다(Ericsson et al., 1993; Ripoll & Benguigui, 1999). 운동학습은 예측된 결과와 실제 결과 간의 오차를 통해 학습자-환경과의 상호작용 모델을 수정하는 데 사용되는 암묵적 과정으로 모델링 된다(Taylor, & Ivry, 2011). 이러한 과정을 자동적이고 암묵적인 작동 방식으로 가정하고, 운동학습을 향상하기 위한 인지 전략으로 활용 가능하다고 보고 있다. 이중 Taylor와 Ivry(2011)는 암묵 및 명시적 과정의 상호작용에 대한 계산 모델을 제시하였으며, 두 인지 과정이 서로 다른 오류 신호로 작동하는 것을 발견하였다. 암묵적 학습은 해당 움직임에 대해 예측된 피드백과 실제 피드백 간의 차이를 반영하는 오류에 의해 주도되는 반면, 명시적 학습은 피드백과 움직임의 목표 위치 간의 차이를 기반으로 하는 오류에 의해 구동된다고 보고 있다. 이러한 수행의 요소는 과제에 직접 반영하는 신호임을 의미하며, 서로 다른 피드백의 제공이 많은 운동학습 과제의 이점으로 숨겨져 있음을 시사하고 있다.

운동학습의 효과를 증진시키기 위해서 다양한 피드백을 활용한 인지 전략의 유도 학습은 학습의 과정을 앞당기는 데 유용하다. 이에 Schmidt(1975)는

정보처리 관점에서 다양한 환경에서의 연습이 더 폭넓은 운동 경험을 하게 하고, 일련의 동작과 관련된 운동프로그램을 발전시킬 수 있다고 하였다. 그리고 Newell(1991)은 생태학적 관점에서 학습자가 다양한 연습 조건을 경험함으로써 환경에 대한 다양한 지각과 탐색을 하게 되어 학습자 스스로가 운동 수행과 관련된 정보를 탐색할 수 있는 능력을 향상할 수 있는 최적의 방법을 발견할 수 있다고 하였다. 하지만, 다양한 연습 조건이 항상 효과적인 학습의 결과를 나타내는 것은 아니며, 앞서 시지각 운동 적응과제와 같이 과제의 난이도, 특성 및 학습자의 인지능력 등 여러 요소를 고려되어야 한다.

인간의 의도적 행동은 인지 단계에서 과제의 목표가 설정되고 원하는 목표를 달성하기 위한 적절한 행동 순서를 결정하게 된다. 이때 일반적으로 명시적 지식을 사용하여 행동 순서를 결정하게 되는데 이러한 학습 단계가 더욱 일반적인 운동 학습제어의 형태로 보고 있다. 그러나, Logan(1988)은 학습을 수행하는 데 있어 명시적 과정과 암묵적 과정이 모두 병렬적으로 처리된다고 가정했지만, 기억이 공고화됨에 따라 두 인지의 상대적 기여도가 자연스럽게 변화하며 수행된다고 보고 있다.

암묵적 학습과 명시적 학습 중 어느 것이 유리한가에 대한 문제와 둘 학습 간의 상호작용은 어떻게 나타나는가에 대한 논란은 여전하다. 운동기술의 학습 과정에서 서로 다르게 습득되는 것이 지각운동과제의 숙련된 수행은 다양한 종류의 상황과 환경 그리고 과제 요소들로부터 영향을 받아 다양한 제어 수준에서 생성된다. 이처럼, 대부분 지도자는 원하는 동작 형태에 대한 지침과 피드백을 제공하는 방식으로 명시적 학습을 제공하지만, 때에 따라 암묵적 학습을 통한 학습 방법 및 재활 치료를 제시할 필요도 있으므로, 두 인지 전략을 활용한 적절한 학습을 제공해 줄 수 있는가가 관건이다.

2) 지각운동 적응과제

최근의 운동학습에 관한 연구들은 인터널 모델을 통해 주어진 환경과 과제의 변화에 대하여 적절하게 대처할 수 있는 적응성 향상에 관한 연구를 집중적으로 다루고 있다(Gillespie et al., 2016; Pierella et al., 2019; Popa et al., 2019). 반복적인 경험으로 형성되는 인터널 모델은 피드백과 에러에 의해 학습되며(Conditt et al., 1997; Kawato et al., 1987), 이와 같은 학습은 지속적으로 변화하는 환경에 반응하며, 의도된 상태와 추정된 상태의 오차가 존재하지 않을 때까지 학습하는 것이다. 피드백-에러를 다루는 연구들은 프리즘 과제, 로봇 팔을 사용하여 임의의 힘의 장이 생성된 환경에서의 뻗기 과제(Lackner & Dizio, 1994), 그리고 가상현실을 활용한 시지각 왜곡 과제를 활용하여(서혜진, 2020), 학습자에게 과제에 요구되는 목적과 환경 조건을 제공하고, 다양한 지각을 통해 주어진 조건에 맞추는 기능 향상의 학습 방법을 적용하고 있다.

① 시지각 운동 적응과제(visuomotor adaptation task)

시지각 운동 적응과제는 잠재적으로 운동제어 및 운동기술 습득을 이해하기 위한 모델로 사용됐으며, 최근 몇 년 동안 많은 학습 과정이 지각운동 적응과제와 같이 작동한다는 것이 점점 더 분명해지고 있다(Wilterson & Taylor, 2019). 시지각 적응과제는 운동학습에서 요구되는 전략 과정을 살펴볼 수 있는 아주 파워풀한 도구로써 앞서 언급한 명시적 학습과 암묵적 학습에 대한 개인의 능력을 구별하는 방법으로 시지각 운동과제를 적용해왔다(Willingham, 1998, Redding & Wallace., 2000). 고전적인 시지각 운동 적응과제의 하나인 프리즘 과제는 참여자가 프리즘 렌즈가 있는 안경을 착용하고, 다양한 지각운동을 수행하는 과제이다. 이때 시야가 왼쪽이나 오른쪽으로 왜곡되어 시력과 고유감각 사이의 오차가 발생하게 되고, 참여자는 이 오차를 줄이기 위해 수정과정을 경험하게 된다. 우리는 이러한 적응과정을 통해 학습이 진행되고 있는 형태를 간접적으로 확인할 수 있다. 특히 시지각 운동 적응과제는 시각을 통한 물체의 인식과

자신의 운동 정보를 받아 변화하는 환경 조건(왜곡상황)에 맞게 행동을 조절할 수 있는 가장 중요한 감각을 이용한 과제이며, 시지각 운동 적응의 조준 과제(reaching task)에서 시각이 가지는 중요한 역할이 손의 움직임 방향 및 범위 조절에 기인하는 역할이라 보고 있다(Kim & Turvey, 1999). 인간은 손의 움직임 방향을 결정하기 위해 의도적인 하나의 목표에 집중하고, 운동 목표가 결정되면 시각으로부터 정보를 전달받아 최대한 직선으로 목표물을 향해 손의 경로를 조절하게 된다. 그러나, 이때 의도한 목표가 다른 위치로 이동할 경우, 참여자는 옮겨진 위치로 경로를 변경하여 수정하게 되는데, 그들은 변경된 위치를 의식적으로 알아차리지 못한다는 것이 수행 후 구두보고를 통해 발견되었다(Bridgeman et al., 1981; Skavenski & Hansen, 1978). 이러한 의미는 참여자가 추가적인 시각 신호(목표지점의 변경)가 주어짐에 따라 목표를 향한 움직임을 제어했음에도 불구하고 수정하는데 걸리는 추가적인 시간이 필요하지 않았다는 것이고, 이는 시각 신호의 정보처리 과정을 거치지 않아도 제어할 수 있고, 외부 자극에 대한 반응을 끌어내는 것과 그 자극에 대한 지각적 경험이 서로 분리된 메커니즘에 작동한다는 것을 나타낸다(Castiello et al., 1991). 이처럼 두 메커니즘은 목표를 향한 의식적인 활동 속 무의식적인 적응과정을 거친다. 사실 역사적으로 지각운동 적응과제를 통한 학습은 무의식적인 암묵 학습의 현상으로 여겨져 왔으나, 이외에도 학습자는 다양한 명시적 지식(목표 전략)을 활용하여 의도적이고 자발적으로 목표를 탐색하여 과제를 수행한다고 보고 있다(Wilterson & Taylor, 2019). 또한, Taylor(2012)는 목표와 움직이는 위치 간의 차이를 기반으로 한 명시적 과정과 애초에 예측된 움직임과 실제 움직임 간의 차이에 기반하는 암묵적 과정이 모두 포함되어 있다고 보고 있다. 이처럼 움직임을 위한 인지 과정은 과제에 직접적으로 반영하는 신호임을 의미하지만, 이는 각 감각의 자극에 따라 서로 다른 인지 과정을 거치도록 유도되기도 한다.

최근 시각을 중점으로 다룬 시지각 운동 적응과제는 시각적 왜곡에 대

한 적응을 형성하는 데 있어 명시적 학습의 중요한 역할이 강조되어왔으나, 왜곡에 적응하는 과정에서 명시적 학습 전략의 기여도는 간과되어왔다(Schween et al., 2020). 이에 Taylor와 Ivry(2012)은 학습자는 자신의 오류를 수정하고, 수행의 정확성을 높이기 위해 적극적으로 의도적인 가설을 형성하여 과제를 수행하려 하며, 이 과정에서 이와 같은 인지 전략이 암묵적 전략으로 나타난 수행보다 적응 속도가 빠르게 나타난다고 보고하였다. 또한, 몇몇 연구를 통해 암묵적 학습과 명시적 학습이 공존하는 적응과제에서 두 인지 전략은 상호작용과 잠재적 간섭으로 이루어지고, 이 중 빠른 적응 속도를 보이는 것은 일반적으로 명시적 학습에, 느린 적응 속도는 암묵적 학습에 기인한다고 보고 있다(Willingham, 1998; Redding & Wallace, 2002).

이러한 시지각 운동 적응과제에서 목표지점을 명시적으로 조정하면 몇 번의 시도만으로도 완벽에 가까운 운동 수행을 해낼 수 있으며, 이 과정에서 나타나는 수행의 변화와 후유증(after effect)을 통해 암묵적 학습의 체계적인 변화를 관찰할 수 있다고 보고한다. 그러나, 몇몇 연구자들은 시각 피드백이라는 강력한 정보의 속성과 안내 기능에 기인하여, 지속적으로 의식적인 적응과정을 겪는 학습으로 암묵적 학습의 요소가 적어, 순수한 암묵적 적응 전략과는 양립할 수 없는 실험이라고 보고한다(Mazzoni & Krakauer 2006; Taylor & Ivry 2011; Schween et al., 2014; Lee et al. 2018a). 이 때문에 다양한 암묵적 학습의 측정 방법을 고안해내기 시작했고 이에 몇몇의 연구자는 섭동을 점진적으로 도입시키는 과제를 제공하여 학습자가 인지하지 못한 채 지각과제를 수행하도록 하거나(Kagerer et al., 2006; Alhussein et al., 2019). 시각에 의존하지 않아도 되고, 명확한 인지 없이도 가능한 로봇을 이용한 운동감각 지각운동 적응과제를 시도하였다.

② 외력을 이용한 지각운동과제(external force-field adaptation task)

인간은 다양한 감각기관으로부터 얻어지는 감각 피드백을 통해 서로 다른 정보를 제공받고, 서로 다른 신경 기전에 의해 움직임이 작동되므로, 다양한 감각 지각운동에 관한 연구가 이뤄져야 한다. 이에 운동학습 연구자들은 시각의 왜곡뿐만 아니라 외력을 제공하고 인간의 운동감각의 적응과정을 관찰해왔다.

외력에 의한 지각운동과제는 동적 오류에 의해 손에 가해진 섭동으로 신체를 움직이며 수정해 나가는 과제이다. 다시 말해, 힘의 장을 활용한 지각운동 적응과제로 외력이라는 환경을 줬을 때 인간의 지각운동은 어떻게 이루어지는지 살펴볼 수 있는 과제이다. 선택된 반응으로 이뤄지는 시각과 달리 고유수용감각은 의식적인 과정 없이도 일어날 수 있다. 이처럼, 서로 다른 메커니즘에 의해 작동되는 동작 시스템은 학습의 과정에서도 차이를 보인다. 예를 들어, 지각운동과제의 하나인 도달과제(reaching task)에서 시각은 손의 움직임 방향과 범위 조절에 기여하며, 운동감각은 최종적 손 위치를 제어하는데 기여한다(Sober & Sabes, 2003). 이는 한 동작을 수행하는 데 필요한 감각이 과제의 목적에 따라 서로 다른 역할을 보이고 적응과정을 거친다는 것을 말해준다. 또한, 소뇌에 의존하는 지각운동과제는 제공된 피드백의 유형에 따라 독립적으로 처리되고 다른 소뇌 구조에 의존함을 보인 연구결과를 통해 서로 다른 기전에 의해 수행된다는 것을 알 수 있었다(Rabe, 2009). 더불어, Krakauer(1999) 등은 외력에 의한 학습이 시각 운동의 학습을 방해하지 않아 두 가지 작업이 서로 다른 메커니즘에 의해 발생할 수 있다고도 하였다. 이처럼 수많은 연구결과에도 불구하고, 운동학적 학습과 동적 학습의 신경 기질의 차이를 밝히는 데 특별히 초점을 맞춘 연구는 미미하며, 연구되어도 다양한 감각 지각 운동과제의 차이점을 찾는 데 실패한 연구들이다(Diedrichsen et al. 2005).

앞서 언급된 시지각 운동 적응 패러다임의 발전을 통해 외력이 주어진 운동학적 섭동에 대한 과제로 확장될 수 있었다. 로봇이 생성한 힘의 장

(Shadmehr & Mussa-Ivaldi, 1994)을 이용해 움직임을 교란하는 방식으로 실험되지만 이와 같은 과제를 통한 인지 전략의 학습을 다룬 연구주제는 소수에 불과하다(Kurtzer et al. 2003; Keisler & Shadmehr, 2010; McDougle et al. 2015; Thürer et al. 2016). 이는 힘의 장이 있는 과제에서 명시적 학습 전략을 측정하는 것이 까다롭기 때문이다. 시지각 운동 적응과제와 달리 외력 감지에 대한 객관적 구두보고가 어렵고, 이러한 언어화 능력은 학습자 개인의 능력에 의해 제한되므로 적절하게 평가하지 못한다는 제한점이 있다(Stadler 1997; Stanley & Krakauer, 2013). 따라서 본 연구에서는 외력이 주어진 지각운동 적응과제에서 언어화 능력을 최소화한 명시적 전략을 제공해 주는 것이 관건이라 할 수 있다.

4. 운동학습과 신경생리학적 기전

최근 운동학습을 담당하는 신경 생리적 메커니즘에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다. 이러한 연구들은 뇌 영상화 기법, 해부와 기능 간의 관계, 경두개 직류전기자극법 등의 방법론을 통해 이루어진다. 이처럼, 다양한 접근을 통하여 학습을 이루는 신경 구조체들의 복잡한 네트워크들 밝히고자 하였고, 학습과 관계된 뇌 영역은 소뇌, 전두엽, 편도가 관여된다고 보고 있다(Thompson & Kim, 1996).

1) 운동학습과 소뇌(cerebellum)

최근 학습을 처리하는 과정에서 소뇌가 중요한 역할을 한다는 것이 밝혀지고 있다. 소뇌의 대표적 기능은 다른 뇌 영역과 상호 교환을 통해 다양한 감각을 통합하고, 신체 균형 유지 및 움직임의 조화를 이룰 수 있도록 해주는 역할을 한다고 본다(Morton & Bastian, 2004). 이 때문에 소뇌의 기능이 저하되면 보행과 손의 움직임 제어에 장애를 보이고, 안구

운동 장애, 섬세한 움직임을 만들어 내는 것이 어렵게 된다. 소뇌는 대뇌(cerebellar) 밑에 자리 잡아 중추신경계의 1/10에 불과하지만, 신경세포의 수효는 전체 신경세포의 절반 이상을 차지할 만큼 인간의 활동에 매우 구체적인 역할을 담당한다. 하지만 이 말인즉슨, 소뇌의 신경세포가 아주 복잡하고, 세밀한 반복 단위들로 구성되어 있어 부분적으로의 기능적 의미를 찾기가 더 어렵다는 의미로 볼 수 있다. 이로 인해 몇몇 선행연구는 운동학습 과제를 수행하였을 때 나타나는 특정 뇌 활성화를 통해 소뇌의 기능적 역할을 찾고자 하였으나, 연구 전반에 걸쳐 공통적인 의미를 찾는 것은 한계였다(Johnson et al, 2019). 최근 이와 같은 한계를 극복하기 위해 특징적 소뇌 병변을 가진 환자들을 대상으로 지각운동과제를 수행하도록 하였고, 수행에서 나타나는 현상들을 바탕으로 소뇌의 기능적 의미를 찾고자 하였다(Tseng et al, 2007, Butcher et al. 2017). 소뇌 질환(cerebellar disease) 환자들은 지각운동과제에서 감각 정보의 예측과 실제 움직임 간의 불일치를 극복하지 못하고 반복적인 적응의 결손을 나타내었다. 이것은 일반적으로 소뇌가 감각 예측 시스템을 작동하는 기전임을 나타내는 연구 결과로(Bastian, 2006; Ishikawa et al., 2016; Ito, 2005; Kawato & Gomi, 1992; Wolpert et al., 1998), 포워드 모델에 의해 감각 예측 오차를 조정한다고 본다. 그러나, 소뇌가 예측되어 계산된 움직임을 제어하는 것보다 변경된 피드백에 대한 제어에 더 강하게 관여할 수 있다는 연구 결과가 보고되면서(Andersson & Armstrong, 1987; Flament et al., 1996; Horn et al., 2004; Imamizu et al., 2000; Moberget et al., 2014), 운동학습의 중추적 기능을 담당하고 있는 소뇌는 감각 피드백 제어에 의해 의도된 상태와 추정된 상태의 오차를 줄이는 역할 이외에도 부가적인 역할이 있을 것이라 하였다(Butcher, 2017; Honda et al.,2018). 또한, 지각운동 적응을 유도하는 과제를 활용하여 뇌 기능 자기 공명 영상 분석(functional magnetic resonance imaging, fMRI)한 결과 소뇌의 신경 활성화는 사실상 절반에 불과하다는 것을 밝혀내며, 소뇌의 주요 기능적 역할에 대해 새로운 관점으로 접근할 필요가 있다고 제안하였다(O’ Reilly et

al., 2009). 더불어, Kawato와 Wolpert(1998)는 소뇌가 포워드 모델과 인버스 모델의 작동 시스템을 모두 포함하고 있다고 제안하며, 감각 예측 그 이상의 기능적 역할을 담당할 수 있다고 주장한다. 이전에는 하나의 기능적 역할에 중점을 두고 연구해왔다면, 최근에는 소뇌가 인터널 모델을 통해 각각의 기능으로 쓰일 뿐만 아니라 교차 기능 또는 동시 모델(Tandem model)과 같이 이중적인 기능적 차원의 의미를 밝히는 연구도 진행되고 있다(Capolei e al., 2019; Honda et al., 2018).

전통적으로 소뇌는 암묵적 적응 과정에서 운동오류를 계산하는 중요한 부위로 가정되어왔다. 소뇌 병변이 있는 환자는 적응과제에서 지속적인 운동오류와 감소된 후유증(after effect)을 나타내지만, 모든 부분에서 절대적인 것은 아니며, 어느 정도 적응의 모습도 보였다(Tseng et al., 2007; Rabe et al., 2009). 이것은 소뇌 내에서 보존된 영역의 역할을 반영된 것이기도 하나, 환자의 이러한 운동 적응은 운동오류 기반의 손상을 상쇄하기 위해 사용되는 다른 인지 전략에 의해 반영된 운동 결과일 수 있다고 제안되었다(Martin et al. 1996). 이와 같은 제안을 뒷받침하기 위해, Taylor 등은(2010) 소뇌 병변 환자에게 명시적 지식이 제공된 시각 회전 운동과제를 수행하도록 하였다. 그 결과, 소뇌 환자는 시각 운동오류를 줄이기 위해 명시적 전략을 사용할 수 있었으며, 이로 인해 안정적인 운동 궤적을 나타낼 수 있고, 적은 후유증을 나타낼 수 있었다. 이러한 연구결과는 소뇌의 적응에 대한 기여가 운동오류에 기반한 암묵적 적응과 관련된 처리 과정으로 제한된다는 이전 가설과 일치한 것이다.

실제로 많은 연구자는 명시적 적응 전략이 암묵적 적응과 질적으로 구별되고 다른 신경 기질에 의존한다고 믿는다(Anguera et al. 2010, 2012; Werner et al. 2014; Thürer et al. 2016). 그러나, 암묵적 적응의 결핍을 보상하기 위해 자발적으로 명시적 적응 전략을 사용하지 못한다는 것은 소뇌가 명시적 지식을 활용하고 계획하는 역할을 담당하고 있음을 뜻하기도 한다. 이에 본 연구는 소뇌의 명시적 및 암묵적 학습이 제공된 지각 운동 적응과제에서 비침습 뇌 자극을 통한 소뇌의 활성화가 명시적 및

암묵적 지식을 활용하는 데 어떠한 영향을 미치는지 알아보고자 한다.

2) 비침습적 뇌 자극에 의한 뇌의 재조직화와 그 효과

운동학습을 위한 운동수행 능력은 일차 운동영역(M1), 전운동영역, 보완운동영역, 소뇌 등의 신경 활동의 변화를 통해 이루어지고, 인간의 뇌는 운동으로 신경교세포의 성장을 유도하는 뇌의 신경 유래인자(Brain-derived neurotrophic factor;BDNF)를 증가시켜 학습 능력을 높인다고 본다. 특히, Berchtold(2012)은 인간을 대상으로 한 연구를 통해 운동과 학습의 결합이 뇌 가소성를 유지하고 증가시키는데 효과적인 역할을 한다고 보고하였으며, BDNF를 발현시키는 유전자를 활성화하여, 학습을 더욱 촉진한다고 보고하였다. 이에, Bagce등(2013)은 반복적 시각 피드백 적응 훈련을 통해 소뇌와 대뇌 피질의 상호 연결성을 촉진 시킴으로써 신경 재조직화를 유도하여 운동학습에 효과적임을 밝혀냈다. 또한, 뇌 가소성을 강화할 수 있는 신경생리학적 도구로 비침습적인 뇌 자극기를 통한 뇌의 활성화는 다양한 운동학습 분야에서 활발히 사용되고 있다.

비침습적 뇌 자극(transcranial direct current stimulation; tDCS)의 한 종류인 경두개 직류 전기자극은 뇌에 전류를 흘려 뇌 신경의 활성화를 조절할 수 있는 장치이다. 이는 운동학습의 촉진과(Celnik, 2015) 운동실조(Benussi et al, 2015, 2017) 및 많은 신경학적 장애의 치료 도구로 쓰이고 있다(Ferrucci et al, 2016). tDCS의 전기자극 형태는 대뇌 피질의 흥분성을 증가시키는 양극 자극(anodal stimulation)과 감소시키는 음극 자극(cathodal stimulation), 무극 자극(sham stimultation)으로 이뤄지며, 두피 표면에 전기자극 패드를 부착하여 약한(2mA) 직류 전기자극으로 통증 없이 안전하게 반복적으로 사용할 수 있다. 이로 인해, 유발되는 신경 가소성의 효과는 주로 뇌 자체의 기능적 변화를 발생시키고(Ferrucci et al., 2015), 운동 회복의 효과를 가져온다고 하였다(Liebetanz et al., 2002). Jayaram(2012)의 연구에 의하면 tDCS를 활용한 소뇌(cerebellum)의 양극 자극은 시지각 운동 적응과제에서 적응 속도를 높이고, 재적응 시에도

비교적 긴 시간이 소요되어 시지각 운동적응의 속도와 습득된 운동적응의 보유에 영향을 끼친다고 보고하였다. 또한, Kumari 등(2020)은 정상인의 소뇌에 tDCS의 양극 자극을 처치한 후, 양쪽이 분리된 트레이드 밀의 보행 적응도 변화를 알아본 결과, tDCS를 적용한 구간에는 보행 학습의 향상을 보이지 않았으나, 학습된 보행 패턴을 유지하는 것에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이처럼 비침습 뇌 자극은 수행 중에 그 효과가 즉각 드러나진 않지만, 수행 능력을 유지하거나, 파지에 효과를 나타내면서 학습에 긍정적인 영향을 미친다고 보았다. 그러나, 이와는 대조적으로 비침습적 뇌 자극을 처치한 집단과 받지 않은 집단 사이에서 유의미한 결과가 나타나지 않은 연구도 더러 있다(Beyer et al. 2017; Hulst et al. 2017; Jalali et al. 2017; Steiner et al. 2016; van der Vliet et al., 2017). 이는 시지각 운동과제에서의 소뇌의 자극이 안구운동(saccadic eye movement) 속도를 변화시켜 과제 수행에 방해가 될 수 있으며(Miall & Christensen, 2004; Ohtsuka & Enoki, 1998), 단순 비침습 뇌 자극의 효과보다 기기를 활용하는 방법의 차이에 따른 연구 결과로 tDCS의 자극 시기(과제 시작, 과제 중)(Hulst et al. 2017, Ehsani et al. 2016; Wessel et al. 2016), 시간, 전극 위치, 강도, 기간, 동일한 환경(과제) 등 여러 측면에서 고려된 연구가 필요하다.

Ⅲ. 연구방법

1. 연구대상

본 연구의 참여자는 34명(집단별: 8명, 평균 나이=26.1±4.9, 만19-37세) 중 적응1 구간의 데이터 출력 오류와 불성실 이행의 참여자, 2명을 제외한 32명(G*power program 96.4% 충족)의 건강한 성인 남자 지원자들로 구성되었다. 모든 참여자는 본 실험과 유사한 형태의 실험에 참여한 경험이 없고, Edinburgh Handness Inventory(Oldfield, 1971)를 통해 확인된 오른손잡이로만 구성되었다. 또한, 뇌 손상의 경험 및 신경학적 손상이 없으며, 소뇌위축의 가족력이 없는 대상군으로 한정하고, 시지각 운동 적응과제를 수행하기 위한 정상 시력(안경과 렌즈 등을 이용한 교정시력 포함, 1.0 이상)을 보유한 자로 선정되었다. 본 실험은 실험 참여 전 실험절차에 관한 모든 설명을 듣고 자발적 참여를 원하는 참여자로만 구성되었으며, 특히 많은 인지 요구가 필요한 본 과제의 피로도와 경두개 직류자극(tDCS)이 가지는 위험도에 대한 충분한 설명이 이루어진 후, 이에 대해 동의한 자로 구성되었다.

표 1 . 본 실험의 참여자 특성

집단	인원(명)		연령(만)	신장(cm)	체중(kg)
Explicit Group (양극,음극,무극)	AE	8	25.25	176.88	76.38
	CE	8	26.38	174.25	74.50
	SE	8	25.63	179.25	75.88
Implicit Group (무극)	SI	8	26.88	177.04	75.41

2. 실험장비

1) Kinarm Exoskeleton 로봇

모든 참가자는 Kinarm Exoskeleton 로봇 장치(KINARM, BKIN Technologies, Kingston, Canada: KINARM)에 앉아 Kinarm Exoskeleton Robots에 양팔을 올린다. 이때 참여자들의 양팔이 과제 수행의 최대 이동 거리가 나올 수 있도록 로봇 팔을 참여자의 각 분절에 맞춰 조정하고, 상지의 움직임과 시야가 자유로울 수 있도록 의자 높이를 조절하였다. 그런 다음, 수평형 LCD 모니터(LG47LD452C, LG전자, 47인치, 1,920×1,080 픽셀 해상도)의 가장자리에 머리를 기대고, 모니터 아래에 장착된 수평 거울을 응시하도록 지시하였다. 또한, 로봇 핸들을 움직여 핸들 끝점과 일치하는 화면 커서(초록색 디스크, 직경 10mm)를 이동할 수 있도록 하여, 제시되는 목표물을 향해 손을 뻗을 수 있도록 하였다. 실험이 진행되는 동안 참여자는 움직이는 손을 직접 볼 수는 없도록 설정되었으며, 커서의 시각화는 과제 구성에 따라 달리 제공되었다. 실험 장치 및 실험 장면은 <그림1>과 같다.

그림 1 Kinarm Exoskeleton Robots 장비 및 실험 장면

2) 경두개 직류 전기자극 장치(tDCS; transcranial direct current stimulation)

경두개 직류 전기자극 장치(tDCS)는 비침습적 뇌 자극 장치로 tDCS의 극성에 따라 뇌 활성도는 반대로 나타난다. 양극(anode) 자극은 뇌 피질의 흥분도를 증가시키고, 음극(cathode) 자극은 감소시킨다. 본 실험에 사용될 전류의 특성은 1회: 20분이며, 전류의 세기는 2mA(전류 밀도 약 0.08mA/cm2) 이다. 전극 판(16cm2)은 스펀지 패드(4.5cm x 6cm, Soterix Medical Inc. EasyPAD)에 넣어, 스트랩을 이용하여 소뇌 피질(양쪽 외 후두융기(inion)에서 3cm)로 추정되는 두피 영역과 편측 어깨(기준 전극) 위 피부 영역에 부착하였다. 피부 저항값을 최소화하기 위해 알콜 솜을 이용하여 팔과 머리 후두 쪽의 유분기 제거와 고성능 젤을 발라 tDCS 장비의 지속성을 극대화하였다.

그림 2. 소뇌 부위의 tDCS 장착 모습

3. 실험절차

본 연구는 암묵 및 명시적 유도 학습의 지각운동 수행의 양상을 살펴보고, tDCS의 소뇌 자극 극성이 명시적 학습 전략이 유도된 적응(학습) 과정에 미치는 영향들을 살펴보았다. 이를 위해 다음과 같은 절차로 실험이 진행되었다<그림3>.

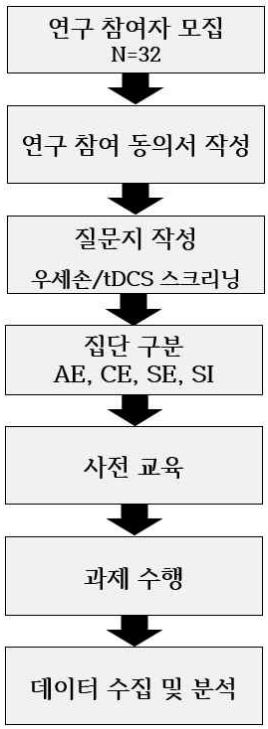


그림 3. 연구절차

1) 참여자모집 및 사전교육

본 실험에 참여하는 대상자에게 실험에 사용될 로봇 장치와 비침습 뇌 자극의 안정성에 대한 충분한 설명을 한 후, 서울대학교 윤리위원회에서 승인(IRB No.2203/003-013)한 연구 참여에 대한 동의서를 작성하도록 하였으며, 실험과제에 영향을 줄 수 있는 신경학적 이상 파악을 위해 사전 tDCS 스크리닝 설문지를 작성하도록 하였다. 이후 동의한 참여자는

무작위로 한 집단에 배정되었으며, 원활한 실험 진행을 위해 실험과제에 대한 사전교육을 받고, 실험에 참여하도록 하였다.

2) 외력이 주어진 지각운동과제 수행

외력이 주어진 지각운동과제는 외력이 주어짐에도 불구하고, 주어진 3초 안에 목표물을 향해 일직선으로 정확히 목표지점에 도달하는 과제이다. 이 과정에서 명시적 유도전략 집단과 암묵적 유도전략 집단 간에 나타나는 수행의 특징을 관찰하고, tDCS 극성(양극, 음극, 무극)이 달리 적용된 명시적 유도전략 집단 간(AE, CE, SE)의 비교 분석을 통해 극성 별 지각운동 수행에 미치는 영향을 보고자 다음<그림4>과 같이 실험이 진행되었다.

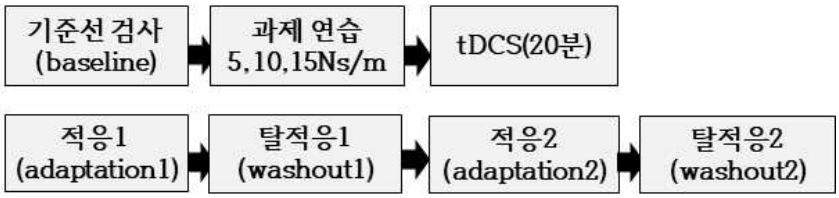


그림 4. 실험절차

① 기준선(baseline) 검사 구간

기준선 구간에서는 외력이 없는 상태(null)로 팔 뻗기 과제를 60회를 수행하였다. 오른손 수행을 마친 후, 50회의 왼손 기준선 검사가 진행되었다. 참여자가 오른손 검지 위 거울 표면(모니터 반사)에 나타나는 지름 0.5cm 커서를 출발지점(빨간 디스크)에 가져다 놓으면 출발지점은 초록 디스크로 바뀌며, 동시에 목표 지점(빨간 디스크)이 생긴다. 참여자는 빨간 디스크를 출발신호로 인지하고, 바로 목표지점을 향을 팔을 뻗는다. 커서가 목표지점에 정확히 도달하였을 때는 목표지점(빨간 디스크)이 초록 디스크로 바뀌어 과제를 정확히 수행하였다는 것을 알 수 있도록 하였다<그림5>.

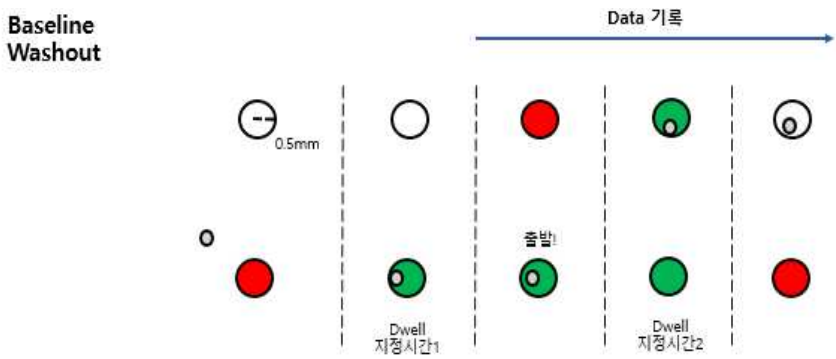


그림 5. 기준선 검사 구간의 과제 수행 절차

② 외부 섭동의 크기 사전 자각

이 구간은 외부 섭동의 크기를 사전에 자각할 수 있도록, 모든 집단은 사전에 다양한 외부 섭동의 크기(5Ns/m, 10Ns/m, 15Ns/m)별로 주어진 팔 뻗기 과제를 총 3회씩 수행하였다. 명시적 유도전략 집단의 참여자에게는 각 섭동의 크기를 구두(명시적)로 알려주고, 이에 대해 자각하도록 하였다. 반면 암묵적 유도전략 집단은 섭동의 크기를 알려주지 않아 단지 다양한 힘의 크기로 주어진 연습과제로만 인지하도록 하였다.

③ ctDCS 적용 구간

양극(anode)과 음극(cathode) 집단은 기준선 구간이 끝난 후, 20분간 tDCS 자극이 주어지며, 무극(sham) 집단은 15초간 전기자극이 주어진 후, 참여자가 알지 못하도록 자동 소멸되었다. 모든 tDCS 처치는 적응구간 이전 종료되었으며, 적용 방법은 실험장비에 자세히 설명되어 있다.

④ 적응(adaptation) 구간

적응 1, 2구간은 <그림 7>과 같이 오른쪽으로 외력(force-field)이 주어진 상태의 팔 뻗기 과제이다. 적응구간은 총 1구간 150회(초기, 중기, 후

기)와 2구간 150회이며, 오른손의 중지 손끝에 있는 지름 0.5cm 원(흰색 디스크)을 출발지점(초록 디스트)에 가져다 놓으면 바로 빨간 목표지점이 생기는 기준선 검사와 달리 목표지점에는 노란불이 켜진다. 이중, 명시적 유도전략 집단은 이 노란불이 1050ms, 암묵적 유도전략 집단은 300ms이 지속된 후 꺼지고, 참여자는 노란불이 꺼짐과 동시에 목표를 향해 팔 뻗기 과제를 수행한다. 명시적 유도전략 집단은 노란불이 켜진 1050ms 동안 외력이 주어질 것이라는 명시적 인지를 하며 과제 수행을 하도록 권고되었고, 암묵적 집단은 그렇지 않았다.

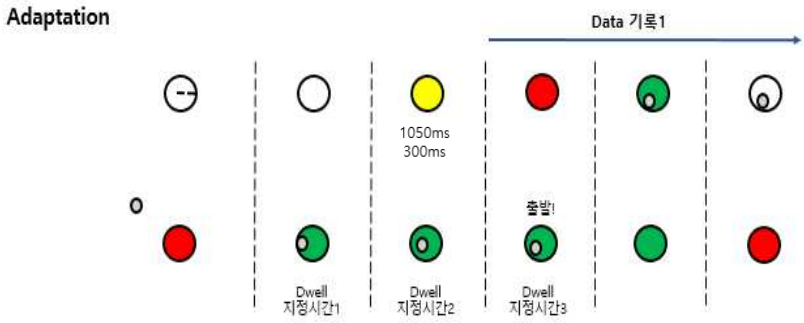


그림 6. 적응 1, 2구간의 과제 수행 절차

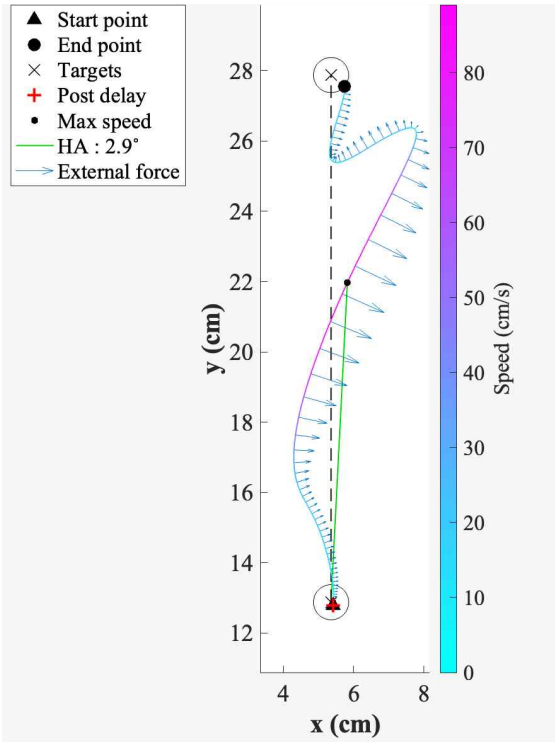


그림 7. 외력(force-field)이 주어진 상태 예시

적응구간 시 주어지는 섭동의 크기는 15*Ns/m*으로, 제공된 외력의 공식은 다음 <공식 1>과 같다.

* 외력(external force-field): 본 과제에서 로봇 팔에 의해 참여자에게 주어지는 외력은 velocity-dependence clockwise perpendicular force이다. 이 force-field는 목표를 향한 도달과제를 수행할 때 시계 방향으로 섭동을 일으키는 형태의 외력<그림 7>으로써 공식 1과 같이 정의된다. 이는 Shadmehr와 Mussa-lvaldi(1994)의 연구에서 사용된 방법을 참고하였다.

$$F = b*\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}*\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} \qquad < 공식1 >$$

$\dot{x}$와 $\dot{y}$는 각 축에 해당하는 속도를 의미하며 b는 positive force field(시계 방향) 15*Ns/m*를 의미한다.

(Shadmehr & Mussa-lvaldi, 1994)

⑤ 탈적응(washout) 구간

탈적응 구간은 기준선 검사와 같이 적응구간 동안 주어진 외력이 사라진 상태(null)에서 팔 뻗기 50회를 수행하였다.

3) tDCS 극성에 따른 명시/암묵 유도전략 집단에 따른 지각운동 적응(학습)과제

① 명시적 유도전략 과제

명시적 유도전략 과제는 tDCS 극성에 따라 명시적 전략이 유도된 집단에서 명시적 지시(instruction)와 명시적 지식을 스스로 표현하는(explicit re-mapping) 과정에서 나타나는 효과를 비교 분석하기 위해 고안된 과제이다. 실험 참여자들은 오른손 시작 위치에서 15cm 떨어진 목표지점을 향해 팔을 뻗는 과제를 수행하였다. 그중 적응구간에서는 목표지점에서 나타나는 노란불이 1050ms 동안 지속되다가 사라지면 출발하도록 하였으며, 팔을 뻗는 동안 주어지는 섭동을 극복하여 3000ms 안에 최대한 직선으로 움직이는 지각운동 적응과제를 수행하도록 하였다. 이때, 명시적 유도전략 집단은 수행 중 움직이는 커서가 보이도록 설정되었다.

② 암묵적 유도전략 과제

암묵적 유도전략 집단은 오른손의 손끝 위치에 생긴 지름 0.5cm 원의 커서를 출발지점(초록색)에 가져다 놓으면 목표지점(빨간색)이 표시된다.

구간별 과제와 모든 수행 횟수는 명시적 유도전략 집단과 같으나, 적응구간 수행 시 주어지는 외력의 유무, 커서 피드백, 오른손의 힘을 왼손에 모방하라는 어떠한 피드백을 받지 않은 채 모든 구간을 수행하였다<그림8>.

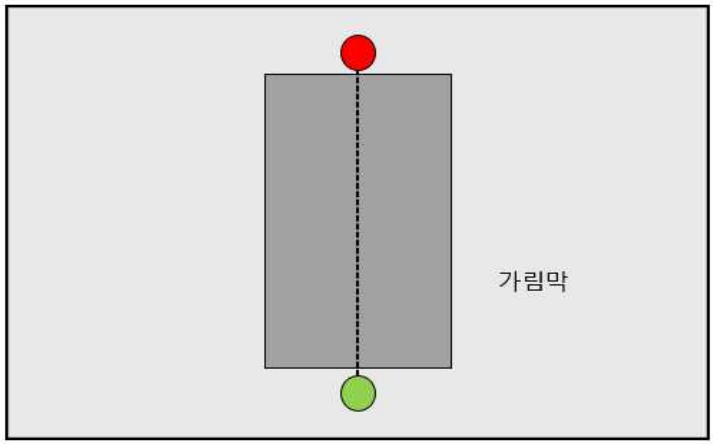


그림 8. 암묵적 유도전략 집단의 적응구간 과제 조건

4. 실험 설계

본 연구는 암묵 및 명시적 유도의 두 집단(2수준) 또는 tDCS 극성에 따른 세 집단(3수준)과 시기(2수준·3수준)에 따른 수행 변인(반응시간, 운동시간, 헤딩각도, 거리오차, 최대속도, 적응지수)을 비교 분석하기 위해 반복측정에 의한 이원분산분석(two-way ANOVA with repeated measures on the 2nd factor)을 시행하였다. 세부 내용은 <표2>와 같다.

표 2. 실험 설계

구분			측정 변인
명시적 유도전략 (Explicit)	양극(Anode)	AE	반응시간: RT(reaction time) 운동시간: MT(movement time) 최대속도: MS(maximum speed) 거리오차: DE(distance error) 헤딩각도: HA(heading angle) 적응지수: AC(adaptation coefficient)
	음극(Cathode)	CE	
	무극(Sham)	SE	
암묵적 유도전략 (Implicit)	무극(Sham)	SI	

5. 자료수집 및 분석

운동학습 연구의 수행 성공은 주로 정확도 비율, 반응시간, 속도와 같은 매개변수 간의 균형을 살펴보고 특징지어진다. 따라서, 본 연구는 지각운동 적응(학습)과제 수행에서 ctDCS 자극 극성에 따라 나타나는 명시/암묵적 유도전략의 수행과정을 다음과 같이 분석하였다. 1) 반응시간(RT: reaction time), 2) 운동시간(MT: movement time), 3) 헤딩각도(HA: heading angle) 4) 거리오차(DE: distance error) 5) 최대속도(MS: maximum speed). Kinarm 기계에서 추출되는 position과 force data는 1000Hz로 추출되었다.

1) 지각운동 적응(학습) 과제 수행 관련 변인 분석

① 반응시간(RT: Reaction Time)

외력이 주어진 지각운동과제는 학습 초기 인지적 처리가 요구되어 반응시간이 증가하다가 학습이 진행됨에 따라 점점 더 적응되어 반응시간이 줄어드는 특성을 보인다(Hardwick et al. 2019; Huberdeau et al. 2019; Leow et al. 2020; McDougle & Taylor 2019). 이러한 반응시간이 ctDCS의 자극 여부에 따라 명시 및 암묵적 전략을 사용하도록 유도된 과제에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보았다.

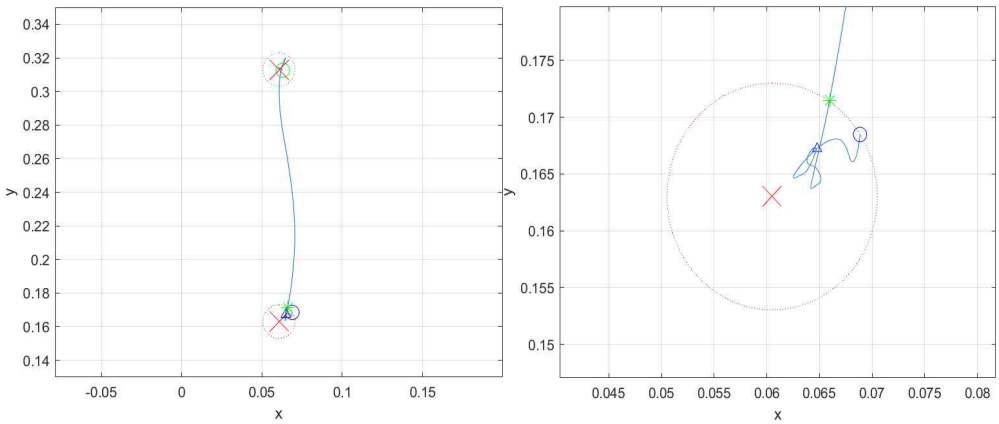


그림 9. 반응시간 측정 방법

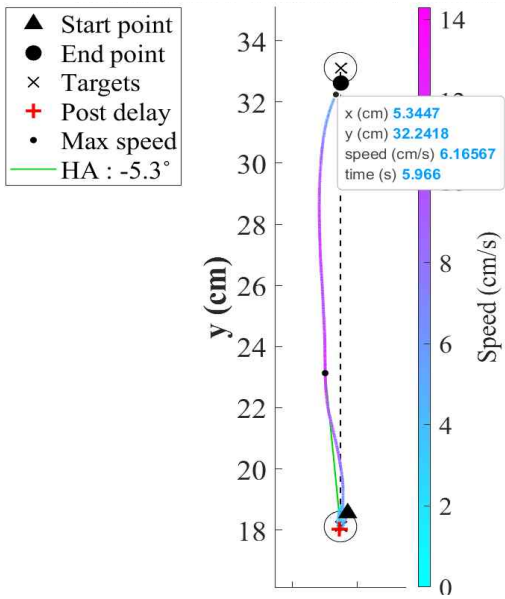
참여자가 커서를 원안(출발지점(빨간 원):반지름 0.5cm)으로 가져다 놓으면 0.3초 후에 목표지점이 생긴다(파란 원:목표지점이 생긴 시점에 커서의 위치를 나타낸 것). 0.3초 후에 생긴 목표지점과 출발지점에 있는 커서가 시작지점을 벗어난 시점(*) 간의 움직인 거리를 이용하여 baseline/ washout 구간의 반응시간을 측정하였다. adaptation 구간의 반응시간은 참여자가 커서를 원안(반지름 0.5cm)으로 가져다 놓으면 노란 불의 목표지점이 생기고, 이 노란 불의 목표지점은 (목표지점이 생긴 시점에 커서의 위치를 나타낸 것; 세모) 300ms(집단 SI)와 1050ms(집단

AE/CE/SE) 동안 지속하다가 사라진다. 이 노란불이 꺼진 시점부터 참여자가 시작 지점을 벗어난 시점 간의 움직인 거리를 통해 적응구간의 반응시간이 측정되었다<그림9>.

② 운동시간(MT: Movement Time)

두 인지 학습 전략이 유도된 과제에서 나타나는 운동시간의 변화는 적응도와 관계가 있다. 따라서, 운동시간은 참여자가 시작지점을 벗어난 시점부터 목표지점에 도달하기까지 걸린 운동시간을 측정하였으며, 참여자가 4초가 지나도록 목표지점에 도달하지 못하면 목표지점은 사라져 과제 수행이 늦어진 것을 참여자가 인지할 수 있도록 하였다. 4초 이내 목표지점에 정확하게 도달하지 못한 경우에는 수행 실패로 결과 데이터에서 모두 제외되었다<그림10>.

$$T = a + b^{*} \log_2\left(\frac{2D}{W}\right) \quad \text{<공식2>}$$



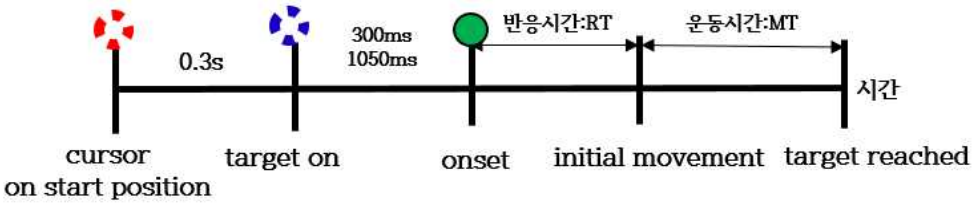


그림 11. 반응시간과 운동시간의 측정구간

③ 거리오차(DE: Distance Error)

참여자가 섭동이 주어진 지각운동 적응과제를 수행할 때 나타나는 동작의 특성을 살펴보기 위해 운동학적 변인에 대해 분석하였으며, 이를 바탕으로 참여자가 경험하게 되는 시각 피드백(x, y) 정보와 운동감각 피드백 정보 사이(외력으로 인한 섭동)에 발생하는 거리 오차 양을 정량화하였다. 시작 지점과 목표지점 사이를 잇는 직선으로부터 실제 손의 움직임과의 거리를 거리오차로 정의하였으며, 아래와 같은 공식을 사용하여 계산하였다. 각 궤적의 거리 오차는 동작의 출발 시점부터 완료 시점(목표)까지의 구간에서 산출하였다<그림12>.

$$A_{error} = \lim_{n \to \infty} \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{2}(x_k + x_{k+1})(y_{k+1} - y_k) \qquad < \text{공식}3 >$$

면적 산출 : 정적분 공식 이용

x : 수평방향 성분(피험자의 측방), y : 수직방향 성분(피험자의 전후방)

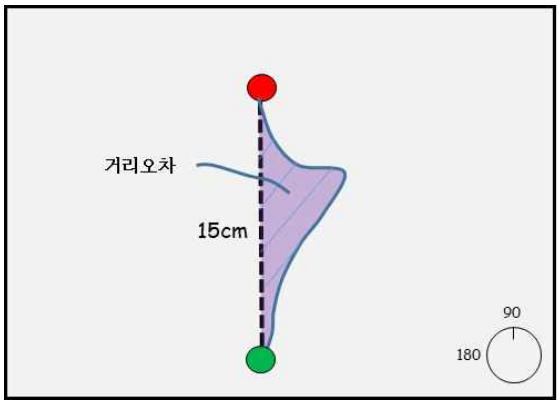
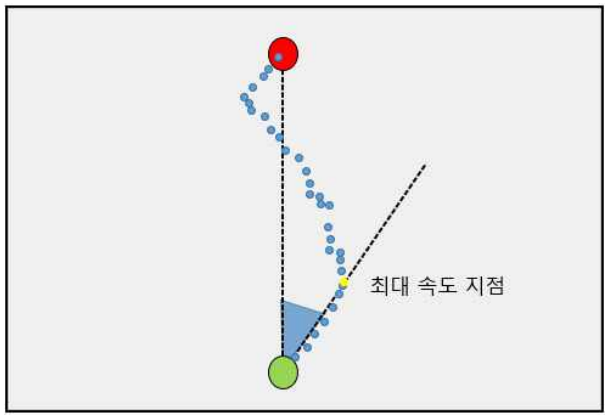


그림 12. 거리오차(Distance Error)

④ 헤딩각도(HA: Heading Angle)

본 연구에서는 출발지점에서부터 움직임이 가장 빠른 지점까지를 초기 구간으로 지정하고, 이 해당 구간이 움직임 수정을 위해 속도를 줄이기 전(최대속도 지점)을 의미하는 것으로 참여자가 감각 예측 오류를 활용하여 의도적으로 움직인 것으로 보았다. 따라서, HA는 출발지점으로부터 최대속도 지점을 이은 선과, 출발지점에서 목표지점을 잇는 직선 사이에 이루는 사이 각을 산출하였다<그림13>.



최대속도를 이루는 지점

$$d = \sqrt{(x_{k+1} - x_k)^2 + (y_{k+1} - y_k)^2} \qquad V_{\max} = \frac{d}{t}$$

직선(출발지점-목표지점)과 위에서 산출된 좌표가 이루는 사이 각

$$:\theta = \tan^{-1}\left(\frac{d_{v_{\max}}}{z}\right) \qquad \text{<공식4>}$$

⑤ 적응지수(AC: Adaptation Coefficient)

지각운동과제 수행에 따른 적응변화를 정량적으로 파악하기 위해 HA의 값과 DE를 지수 감소 함수(exponential decay function)에 적용하고, 적응1 구간의 적응된 기준값에 washout 1구간에서 그 기준값에 도달하는 데에 걸리는 적응 조건의 시행 수를 적응 지수(AC)로 보았다. 이와 동일한 방법으로, 적응 효과가 풀리는 데에 걸리는 적응 조건 후의 기본 조건의 시행 수를 탈적응 정도로 계산하였다(Keating & Thach, 1990).

$$y = a - b \times e^{-t/c} \qquad \text{<공식5>}$$

a: 지수 감쇠 함수의 최종값 b: 첫 번째 시도 값으로부터 적응될 때까지 요구되는 크기

t: 총 trial 수 c: 감쇠 상수(적응이 일어나는 비율 AC)

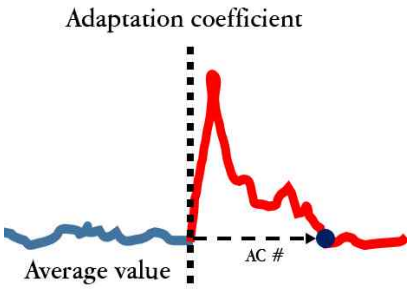


그림 14. 지수 감소 함수(AC)

2) Data cleansing

선행연구들에 따라 1) 개인의 반응시간(RT) 평균 표준편차의 3배 값을 모두 제거하였으며(James et al., 2021), 출발신호 이전 출발지점 밖으로 벗어 난 시도는 설정한 과제의 성격에 부합하지 않으므로 모두 제거되었다. 2) 운동시간(MT)이 제한 시간 4초(3초+1) 이상인 값은 모두 제거되었다<그림15>. 3) 목표지점에 도달하지 않고, 시도를 종료한 경우는 제외되었다<그림16>. 4) 모든 첫 번째 시도는 제거되었다.

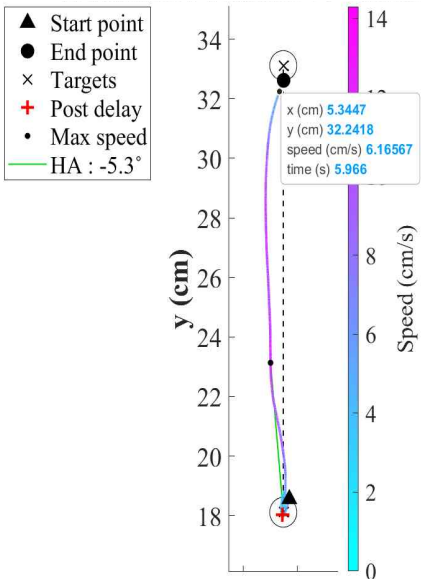


그림 15. 제한 운동시간을 초과한 경우

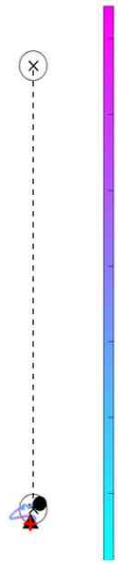


그림 16. 목표 타겟에 도달하지 않은 경우

6. 통계처리

실험을 통해 얻은 모든 자료는 MATLAB(The MathWorks) 및 R(R Foundation for Statistical Computing)을 사용하여 데이터를 분석하였으며, 통계처리는 SPSS 28.0을 사용하였다. 두 집단(2수준) 또는 (3수준)과 시기(2수준) 또는 시기(3수준)에 따른 수행 변인(RT/MT/HA/ED/MS)을 비교하기 위해 반복측정에 의한 이원분산분석(two-way ANOVA with repeated measures on the 2nd factor)을 시행하였으며, 상호효과는 *Tukey HSD* 사후검증을 시행하여 구체적인 요인별 다중비교 결과를 확인하였다. 모든 통계적 유의수준은. 05로 설정하였다.

Ⅳ. 연구결과

1. 인지 전략에 따른 지각운동 적응(학습)수행의 차이

감각 운동의 적응은 숙련된 운동 수행을 유지하고, 축적하며 이를 바탕으로 운동 전략을 형성한다. 따라서, 우리는 지각운동 적응과제의 수행과정을 면밀히 관찰함으로써 인간의 운동시스템이 어떠한 방식으로 과제의 어려움을 극복하고 학습되는가에 대한 몇 가지 정보를 살펴볼 수 있다. 이를 위해, 본 연구에서는 외력이 주어진 특정 과제를 통해 외력에 의해 나타나는 동작 오류를 수정하기 위해 사용되는 적응 전략이 지각운동 수행과정에서 어떠한 영향을 미치는지 살펴보았다. 먼저, 명시적 유도전략과 암묵적 유도전략에 따른 지각운동 수행의 특징을 살펴보기 위해 ctDCS의 자극이 주어지지 않은 두 집단(sham 집단 SE와 SI)에 대해 분석되었다.

SE 집단은 Damping coefficient가 15Ns/m의 외력이 주어질 것에 대한 사전 정보를 전달받았으며, 팔 뻗기 과제를 수행하는 동안 손의 움직임(커서)에 관한 시각 정보도 주어졌다. 또한, 팔을 뻗기 이전 목표지점에서 노란불이 나타나고, 1050ms를 기다리는 동안 외력이 주어질 것을 되도록 인지하고 목표지점을 향해 출발하도록 권고하였다. SI 집단은 외력이 주어질 것을 알지 못하며, 움직이는 커서에 관한 시각 피드백이 없고, 노란불이 나타난 후 300ms을 기다렸다가 목표지점이 사라진 뒤 팔을 뻗어 목표지점에 도달하도록 하였다.

1) 명시적 / 암묵적 유도전략에 따른 지각운동 수행 비교(2 집단: SE, SI)

① 기준선 검사 구간(4 집단: AE, SE, CE, SI)

(1) 반응시간(RT)과 운동시간(MT)

집단 간 지각운동과제의 기본 수행 능력을 검증하고자 기준선 검사의 RT, MT를 계산하여 일원 분산분석(one-way ANOVA)을 시행하였다. 그 결과, RT와 MT 모두 기준선 검사에서 유의한 차이가 나타나지 않았다 (p>.05). 따라서 본 실험을 진행하기에 참여자들의 기본 지각운동 능력은 비슷한 것으로 판단된다<표3>.

표 3. 모든 집단의 RT/MT 기준선 검사의 일원배치 분산분석 결과 (N=32)

구분			반응시간(RT) / 운동시간(MT)				
			N	평균(M)	표준편차(SD)	F	P
Baseline 기준선 검사	RT	AE	8	1.54	0.06	0.818	.522
		CE	8	1.50	0.08		
		SE	8	1.52	0.06		
		SI	8	1.55	0.06		
	MT	AE	8	0.98	0.33	0.548	.702
		CE	8	0.98	0.32		
		SE	8	0.95	0.20		
		SI	8	1.12	0.28		

*p<.05, **p<.01, ***p<.001

(2) 거리오차(DE)

집단 간 지각운동과제의 수행 정확성을 비교 분석하고자 출발지점에서 목표지점 간의 직선거리에서 벗어난 DE를 산출하여, 일원 분산분석을

시행하였다. 분석 결과, 집단 간 ED는 통계적으로 유의하지 않아, 지각 운동 수행에서 집단 간 ED(수행의 정확성)의 차이가 없음을 검증하였다. 기준선 검사에서는 참여자가 섭동이 없는(null) 환경에서 손을 뻗어 목표 지점에 정확히 직선으로 도달하는 과제이다. SI와 SE 집단의 각 참여자의 기준선 마지막 시도의 수행 양상은 다음 <그림17>과 같다.

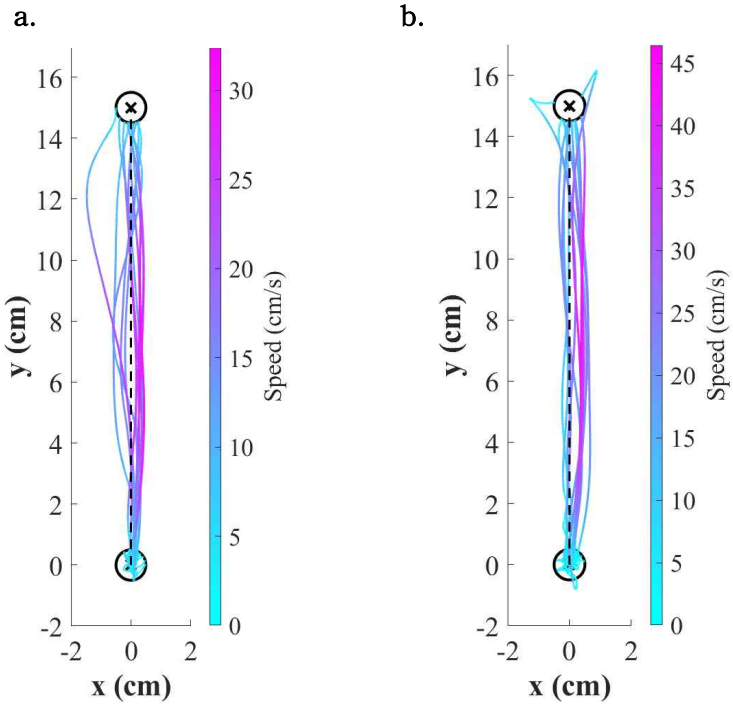


그림 17. a.암묵 및 b.명시적 집단별 기준선 검사의 마지막 시도 양상

② 적응 1구간

(1) 반응시간(RT)과 운동시간(MT)

명시와 암묵적 유도전략 과제의 지각운동 수행을 비교 분석하기 위해 ctDCS의 자극이 없는 두 Sham 집단(SE와 SI) 간의 RT와 MT를 측정하여, 독립표본 *t*-검정(independent *t*-test)을 시행하였다. 그 결과, 두 집단 간의 RT는 통계적으로 유의하게 나타났다[t=4.70, p<0.000]. 따라서, 서로

다른 인지(학습) 유도전략에 따라 RT에 차이가 있음을 나타냈으며, SE 집단의 평균 반응시간은 0.43ms, SI는 0.21ms으로 암묵적 전략을 사용하도록 유도된 집단이 상대적으로 빠른 반응시간을 나타냈다. 그러나, 집단 간 운동시간은 통계적으로 유의하게 나타나지 않아[t=0.10, p>.05], 두 집단 간의 운동시간에는 차이가 없음을 나타냈다<그림18>.

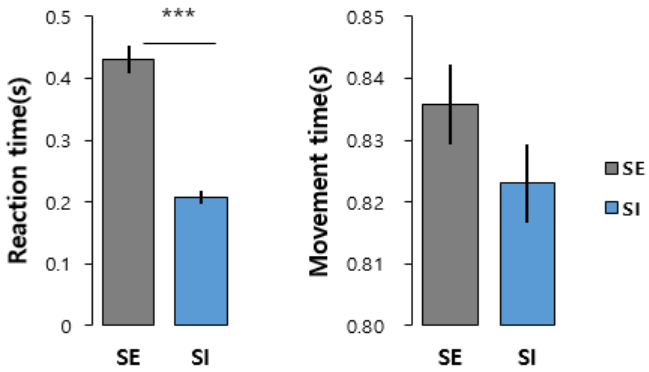


그림 18. 두 집단(SE, SI)의 RT와 MT

표 4. 평균 반응시간(RT)과 운동시간(MT) 독립 t-검정 결과

구 분		반응시간(RT) / 운동시간(MT)			$t(p)$
		N	평균(M)	표준편차(SD)	
RT	SE	8	0.43	0.10	4.70(0.000)***
	SI	8	0.21	0.09	
MT	SE	8	0.84	0.26	0.10(0.922)
	SI	8	0.82	0.25	

*p<.05, **p<.01, ***p<.001

(2) 거리오차(DE)와 헤딩각도(HA)

각 집단(SE, SI) 간 시기[초기(1-50), 중기(51-100), 후기(101-150)]에 따른 지각운동과제의 수행 정확도를 비교 분석하기 위해 집단의 시기별 DE를 산출하여 반복측정에 의한 이원분산분석(two-way *RM* ANOVA)을 시행하였다. 분석 결과, 집단의 주효과 및 시기, 집단과 시기에 따른 상호작용 효과 모두 유의하지 않았다<표5>. 따라서, 적응 1구간에서는 SE와 SI의 간의 시기별 지각운동 수행의 정확도에는 차이가 없음을 알 수 있다.

표 5. 집단(2수준)과 시기(3수준)에 따른 DE 비교(two-way RM ANOVA)

변인	Sum Sq	df	Mean Sq	*F*	*P*
Group	352.144	1	352.144	3.214	0.080
Period	133.655	2	66.828	0.610	0.548
Group * Period	211.053	2	105.527	0.963	0.390
오차	13.794	20.432	20.252		

*p<.05

참여자는 지각운동과제에서 어떤 의도에 근거하여 움직임을 전략적으로 만들어 내는지를 정량적으로 파악하기 위해 처음 손을 뻗은 의도한 방향, 헤딩각도(HA)를 산출하여 반복측정에 의한 이원분산 분석을 시행하였다. 그 결과, 집단의 주효과 및 집단과 시기에 따른 상호작용 효과 모두 통계적으로 유의하지 않았다(p>.05). 따라서, 적응 1구간에서의 HA는 시행 수를 거듭함에 따라 둘 집단 간의 오차가 커졌으나, 유의한 차이를 나타내진 않았다<그림19>.

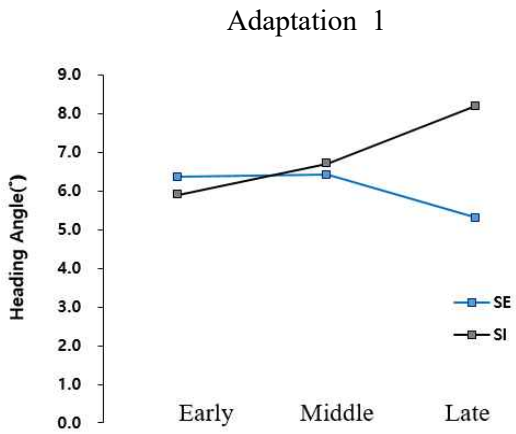
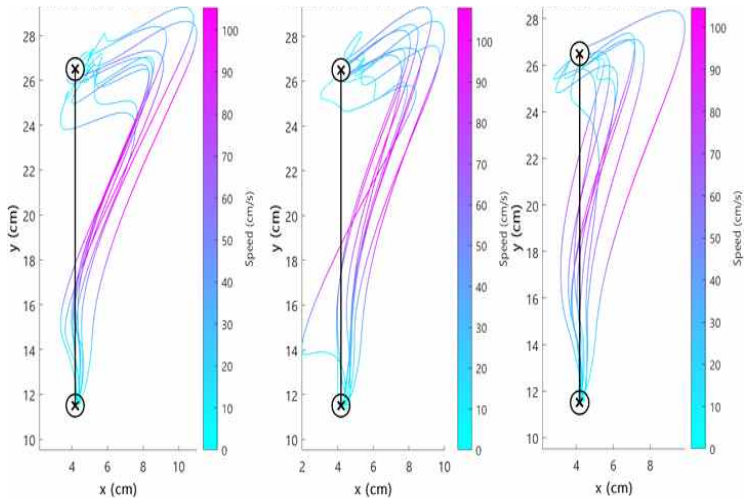


그림 19. 적응 1구간에서의 집단 SE와 SI의 HA

(3) 최대속도(MS)

다음은 지각운동과제에서 집단(2수준: SE, SI) 간 시기(3수준: early, middle, late)에 따른 움직임의 최대속도 변화를 살펴보기 위해 반복측정에 의한 이원분산분석을 시행하였다. 분석 결과, 집단의 주효과는 나타났으나 [F(1,42=4.125, p=.049], 집단과 시기의 상호작용 효과는 나타나지 않았다. 최대속도는 SI 집단이 더 높았다.



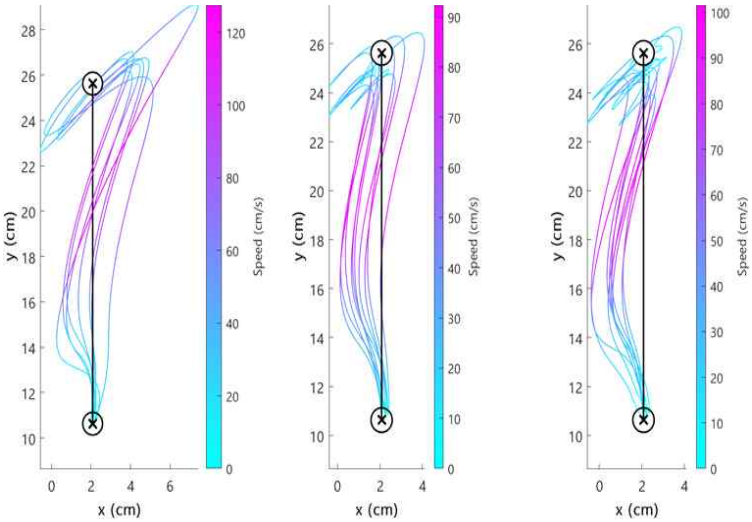


그림 21. SI single-subject의 적응 1구간 과제 수행 변화

③ 탈적응 1구간

적응 1구간이 끝난 두 집단(SE와 SI)의 모든 참여자는 외력이 제거되었다는 명시적 지식을 부여받고, 시각적 피드백이 없는 탈적응 1구간을 수행하였다. 섭동이 더는 존재하지 않는다는 명시적 지시에도 불구하고 적응된 상태로 남아있는 움직임을 통해 DE 값을 산출하여 적응도를 파악하였다.

(1) 거리오차(DE)

집단(SE, SI)의 지각운동과제 수행의 탈적응 과정을 비교 분석하기 위해 집단간 시기(2수준: 적응 1구간(last), 탈적응 1구간(all))에 따른 지각운동 수행의 정확성을 비교한 결과, 집단과 시기의 상호작용 효과는 나타나지 않았다. 이러한 결과는, 외력이 주어진 명시적 유도전략과 암묵적 유도전략 집단 간의 운동학습(적응) 시기에 따른 수행의 정확도 차이가 나타나지 않는다는 것을 의미한다. SI 집단 내 시기에 따른 유의한 변화는 있

었으나, 적응 1구간의 평균 거리오차보다 유의하게 낮아져 적응 1구간의 학습 효과가 나타나지 않은 것으로 판단된다<그림22>.

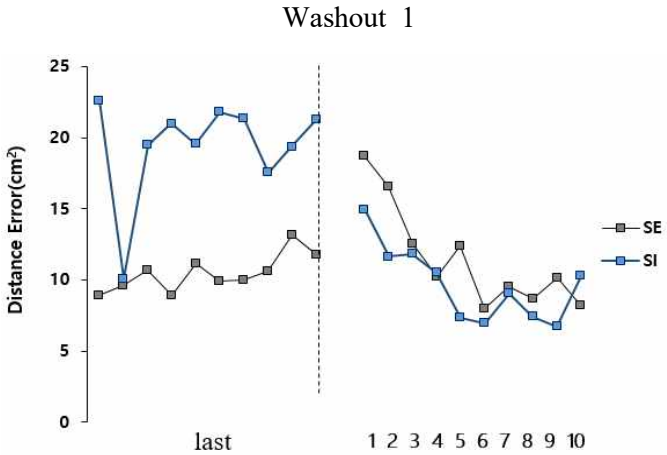


그림 22. 적응 1구간(last)과 탈적응 1구간의 수행 양상

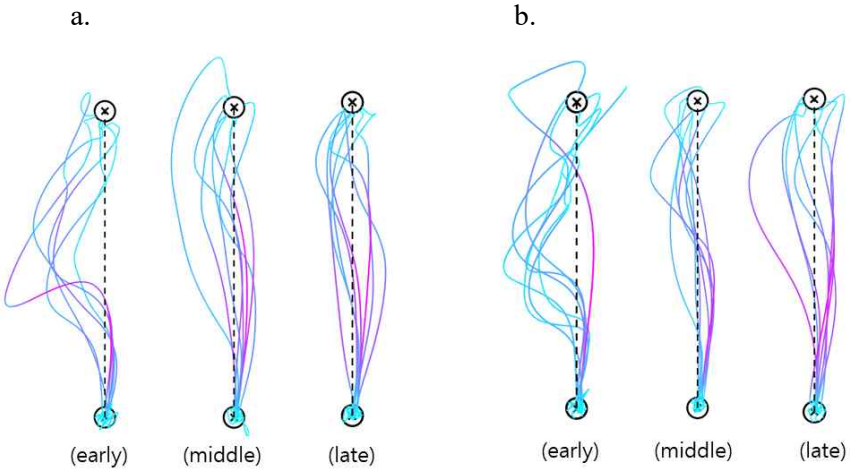


그림 23. a. SE와 b. SI의 탈적응 1구간의 수행 변화

④ 적응 2구간

(1) 반응시간(RT)과 운동시간(MT)

적응 2구간의 RT와 MT를 산출하여, 집단 간 지각운동 수행의 차이를 검증하고자 독립표본 *t*-검정(independent *t*-test)을 시행하였다. 그 결과, RT는 적응 1구간과 같이 집단 간 통계적으로 유의하게 나타났고[t=3.76, p<0.000], MT는 유의하지 않았다[t=0.10, p>.05]. 따라서, SE와 SI는 적응 시기와 상관없이 RT에 차이가 있음을 나타냈으며, SE 집단의 평균 반응 시간은 0.38ms, SI는 0.21ms으로 암묵적 전략을 유도한 집단(SI)이 여전히 빠른 반응시간을 나타냈다<그림24>.

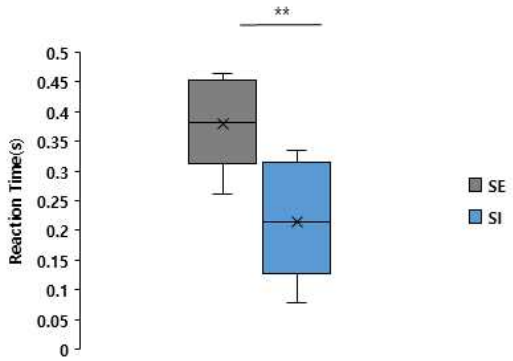


그림 24. 적응 2구간의 집단 SE와 SI의 RT

표 6. 전체 평균 반응시간(RT)과 운동시간(MT) 독립 *t*-검정 결과

구 분		반응시간(RT) / 운동시간(MT)			*t(p)*
		N	평균(M)	표준편차(SD)	
RT	SE	8	0.38	0.08	3.76(0.002)**
	SI	8	0.21	0.10	
MT	SE	8	.64	0.14	0.10

*p<.05, **p<.01

(2) 거리오차(ED)와 헤딩각도(HA)

각 집단(SE, SI) 간 시기[초기(1-50), 중기(51-100), 후기(101-150)]에 따라 지각운동과제의 수행 정확도 변화를 비교 분석하기 위해 DE를 산출하여 반복측정에 의한 이원분산분석(two-way *RM* ANOVA)을 실시하였다. 다만, *Mauchly*의 구형성 검정을 만족하지 않아, *Greenhouse-Geisser* 결괏값을 참조하였다. 시기 및 집단(p>.05), 시기와 집단의 상호작용 효과 모두 유의하지 않았다[F(2,42)=.705, p>.05]. HA 결과 또한, 집단[F(1,42)=2.261, p=.140] 시기[F(2,42)=.297, p=.745] 시기*집단[F(2,24)=0.191, p=.827) 모두 유의하지 않았다.

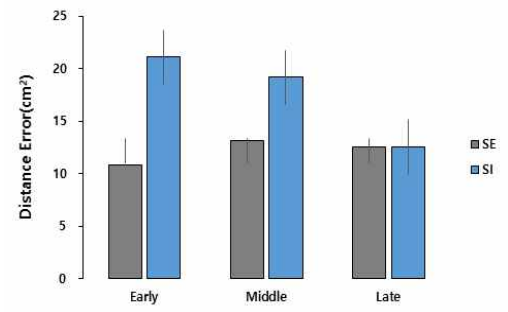


그림 25. 적응 2구간의 SE, SI의 DE

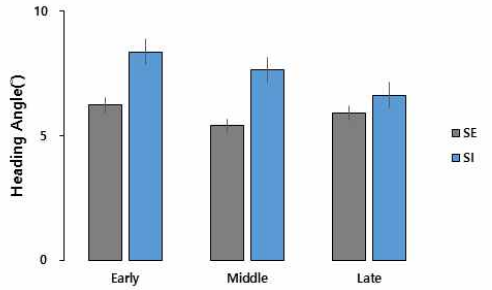


그림 26. 적응 2구간의 SE, SI의 HA

(3) 최대 속도(MS)

각 집단(2수준:SE, SI) 간 시기(3수준:초기(1-50), 중기(51-100), 후기(101-150))에 따라 지각운동과제의 수행 변화를 비교 분석하기 위해 MS를 산

출하여 반복측정에 의한 이원분산분석(two-way *RM* ANOVA)을 실시하였다. 적응 2구간에서의 MS는 집단과 시기에서 모두 유의하지 않았다(p>.05).

⑤ 적응 1구간과 2구간 비교

(1) 집단 내 지각운동 수행의 변화

각 집단 내 지각운동 수행의 연습 시기에 따라 학습된 정도의 차이가 있는지 알아보기 위해 적응 1구간과 2구간의 대응표본 t-검정(paired t-test)을 시행하였다. 그 결과, SE 집단의 RT와 MT가 유의수준 0.05를 기준으로 통계적으로 유의하게 나타났고[t=2.932, p=0.022; t=2.461, p=.043], SI 집단은 MS에서 유의한 결과가 나타났다[t=9.297, p=.000]. 따라서, 적응 1구간과 2구간의 지각운동 수행을 거치며 SE 집단은 RT와 MT가 유의하게 줄어들었고<그림27>, SI는 MS가 유의하게 줄어드는 변화를 보여 <그림28>, 두 집단은 서로 다른 수행 요인에 의해 지각운동에 적응(학습)되는 것을 파악할 수 있다. 이외 DE와 HA는 SE와 SI 집단 모두 유의한 차이를 나타내지 않아, 수행을 거듭하여도 정확도와 수행 의도의 변화는 크지 않다는 것을 알 수 있다.

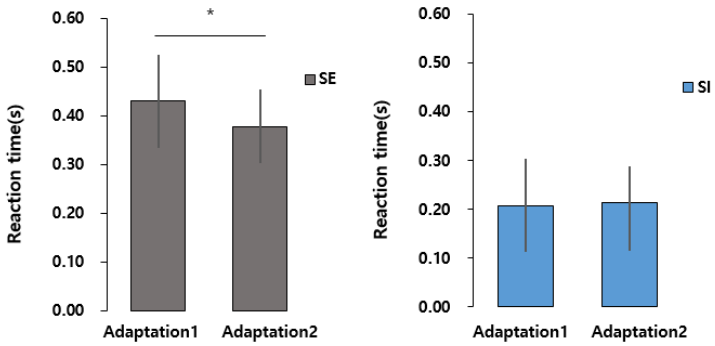


그림 27. 적응 1, 2구간의 SE와 SI 집단의 RT

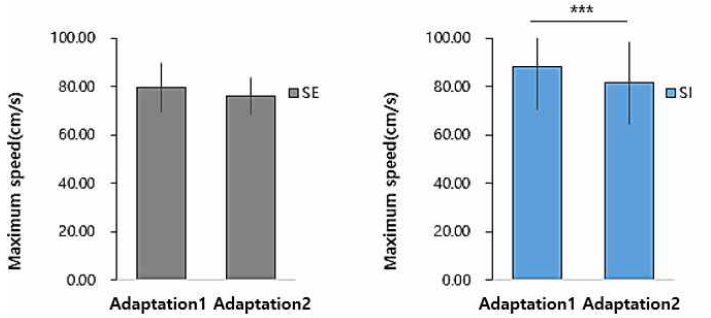


그림 28. 적응 1, 2구간의 SE와 SI 집단의 MS

표 7. 각 집단 내 변인 별 대응표본 *t*-검정 결과

구 분			기술 통계량			*t*(*p*)
			N	평균(M)	표준편차(SD)	
RT	SE	adaptation 1	8	0.43	0.10	2.932(0.022*)
		adaptation 2	8	0.38	0.08	
	SI	adaptation 1	8	0.21	0.09	-.422(.686)
		adaptation 2	8	0.21	0.10	
MT	SE	adaptation 1	8	0.84	0.26	2.46(.043*)
		adaptation 2	8	0.64	0.14	
	SI	adaptation 1	8	0.82	0.25	1.20(.269)
		adaptation 2	8	0.77	0.25	
MS	SE	adaptation 1	8	79.70	10.03	1.453(.190)
		adaptation 2	8	76.00	7.58	
	SI	adaptation 1	8	88.30	17.58	9.297(.000***)

*p<.05, **p<.01, ***p<.001

(2) 집단 간 시기에 따른 지각운동 수행의 변화

각 집단(SE, SI)의 적응 1구간(early, middle, late)과 2구간(early, middle, late)의 RT, MT, HA, DE, MS를 산출하여, 집단과 시기에 따른 차이를 검증하기 위해 반복측정에 의한 이원분산분석을 시행하였다. 그 결과, RT, DE, MS의 집단의 주효과는 나타났으나[집단:$F(1,84)=96.716$, $p<.001$, $\eta^2=0.535$], [집단:$F(1,84)=4.994$, $p=.028$, $\eta^2=.056$], [집단:$F(1,84)=96.716$, $p=.016$, $\eta^2=.067$] 상호작용 효과는 나타나지 않았다.

표 8. 집단별 시기에 따른 지각운동 수행과정의 요인별 특징

적응1 구간 (학습 요인)	적응1(초기 연습)	적응2(후기 연습)
RT(reaction time)	SI: 반응시간 빠름 / SE: 시행에 따른 변화 있음	
MT(movement time)	SE: 시행에 따른 변화 있음	
HA(heading angle)	집단 간 차이 없으며, 시행에 따른 변화 없음	
DE(distance error)	수행 정확도 차이 없음	
MS(maximum speed)	SI: 최대속도 높음 / SI: 시행에 따른 변화 있음	

⑥ 탈적응 2구간(집단: SE, SI)

탈적응 구간은 지각운동 수행의 마지막 구간으로 적응 1, 2구간을 통한 학습(적응)의 공고화(consolidation)를 살펴보기 위해 외력이 없는 null 조건으로 진행된 구간이다. 먼저, 적응의 집단별 지각운동 수행의 변화양상을 비교 분석하기 위해 RT, MT, HA, MS를 산출하여, 집단별 시기에 따른(적응 2구간(late)-탈적응 구간(all))의 변화를 검증하였다. 또한, 수행의 정확도를 판단하는 수행 요인, DE(적응 2구간의 DE와 탈적응 구간의 DE)를 산출하여 집단 간 비교 분석을 위해 일원 배치 분산분석을 시행하였다.

(1) 반응시간(RT)과 운동시간(MT)

각 집단(2수준)의 적응2 구간의 후기(late)와 탈적응 구간(washout_all)의 RT와 MT를 산출한 후, 반복측정에 의한 이원 분산분석을 시행하였다. RT는 집단과 시기의 주효과 및 상호작용 효과 모두 유의하게 나타났다 <표9>. 따라서, 집단별 시기에 따라 RT의 유의한 차이가 있으며, 이는 암묵적 집단 SI의 RT가 적응과 탈적응 구간 간의 차가 SE보다 크다는 것을 알 수 있다<그림29>.

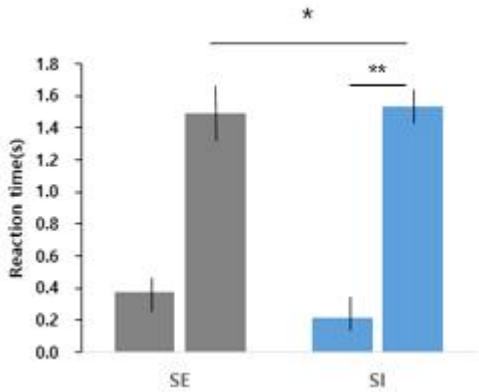


그림 29. SE와 SI 집단의 RT 변화

표 9. 집단(2수준)과 시기(2수준)에 따른 RT비교(two-way *RM* ANOVA)

변인	Sum Sq	df	Mean Sq	*F*	*P*	η^2
Group	0.030	1	0.030	4.608	0.041*	0.141
Period	11.869	1	11.869	1806.990	0.000***	0.985
Group * Period	0.085	1	0.085	12.887	0.001**	0.315
오차	0.184	28	0.007			

*p<.05, **p<.01, ***p<.001

MT는 시기(2수준: 적응 2구간(late), washout(all))의 주효과는 나타났으나[$F(1,28)=26.562$, $p<.001$, $\eta^2=.487$]. 집단*시기의 상호작용 효과는 나타나지 않았다. 따라서, SE와 SI 집단은 서로 유사한 de-adaptation(MT) 양상을 나타냈다<표10>.

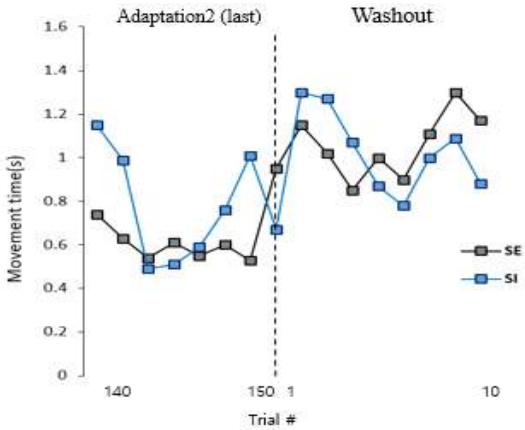


그림 30. 탈적응 2구간의 SE와 SI 집단의 MT

표 10. 집단(2수준)과 시기(2수준)에 따른 MT비교(two-way *RM* ANOVA)

변인	Sum Sq	df	Mean Sq	*F*	*P*	η^2
Group	0.018	1	0.018	0.528	0.474	0.018
Period	0.927	1	0.927	26.562	0.000***	0.487
Group * Period	0.050	1	0.050	1.423	0.243	0.048
오차	0.977	28	0.035			

*$p<.05$, **$p<.01$, ***$p<.001$

(2) 거리오차(DE)와 헤딩각도(HA)

DE는 시기(2수준: 적응 2구간(late), washout(all))에 따른 주효과는 나타났으나[$F(1,28)=10.016$, $p=.004$, $\eta^2=.263$], 집단과 시기의 상호작용 효과는 나타나지 않았으며, 집단별 대응표본 *t*-test를 통해 기준선의 기본 능력과 적응 후를 비교분석하였다. 그 결과, SE는 유의한 변화를 나타내지 않았으나[SE: $t=.737$, $p=.485$], SI 유의한 변화를 나타냈다[SI: $t=4.705$, $p=.002$]. HA에서는 집단*시기의 상호작용이 나타났으며<표11>, washout 구간에서 집단 간의 유의한 차이를 나타냈다<그림34>. 따라서, SE와 SI는 적응(학습)된 후의 후유증을 통해, 과제를 수행한 유도 전략에 따라 서로 다른 의도가 지각되어 적응(학습)해 왔다는 것을 파악할 수 있으며, SI 집단이 후유증 구간에서 기준선 검사보다 유의하게 높아진 정확도를 나타내는 결과를 낳았다<그림31>.

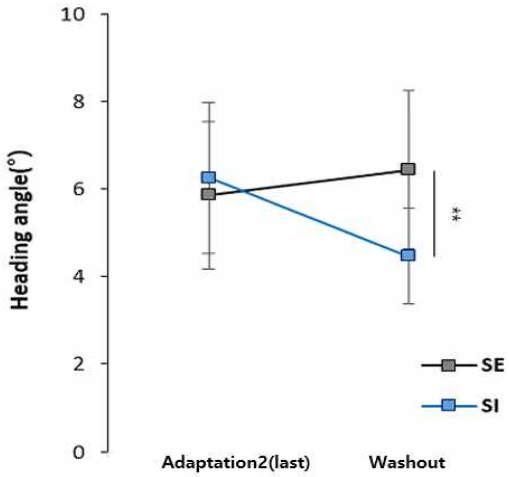


그림 31. 탈적응 2구간의 SE와 SI 집단의 HA

표 11. 집단(2수준)과 시기(2수준)에 따른 HA비교(two-way *RM* ANOVA)

변인	Sum Sq	df	Mean Sq	*F*	*P*	η^2
Group	4.909	1	4.909	1.922	0.177	0.064
Period	2.944	1	2.944	1.153	0.292	0.040
Group * Period	11.093	1	11.093	4.344	0.046*	0.134
오차	71.501	28	2.554			

*p<.05

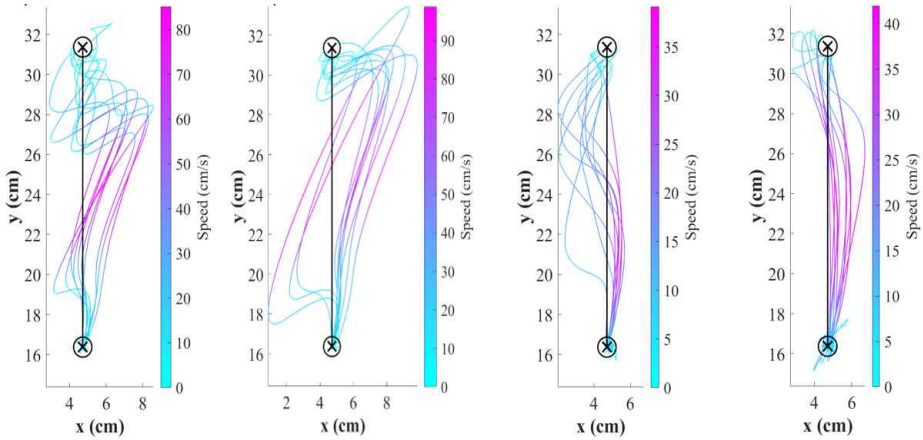
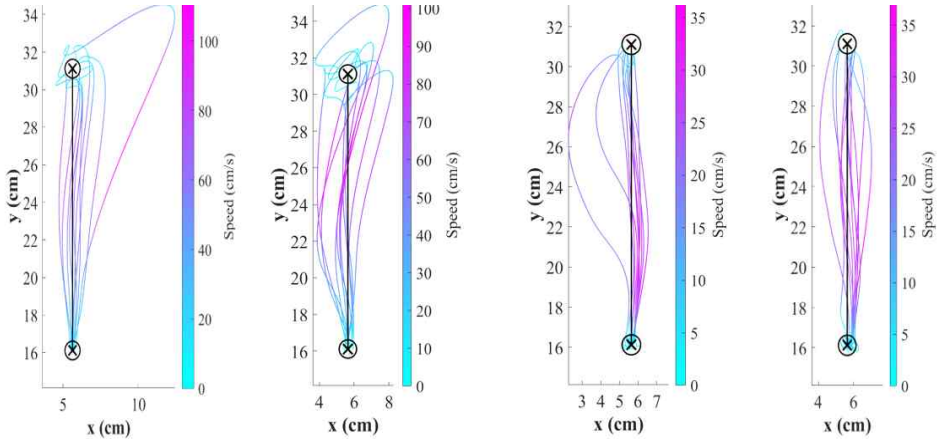


그림 32. SE: single-subject.16 적응 2 (initial-last) & 탈적응 2 (initial-last)



(3) 최대속도(MS)

탈적응 구간의 마지막 학습 요인으로 최대속도를 산출하여, 집단(2수준)에 따른 시기(2수준)의 반복측정에 의한 이원분산분석을 시행하였다. 그 결과, 거리 오차와 같이 시기에 따른 주효과는 나타났으나[$F(1,28)=165.524$, $p<.001$, $\eta^2=.855$], 집단과 시기의 상호작용 효과는 나타나지 않았다.

(4) 적응지수(AC)

지각운동 적응의 변화를 정량적으로 파악하기 위해 DE와 HA의 값을 지수 감소함수(exponential decay function)에 적용하여, 적응 2구간의 (late) 구간 값의 평균값을 기준값으로 정하고, 탈적응 구간에서 이 기준값에 도달하는 데 걸리는 적응 조건의 비율을 적응 정도로 산출하여 집단 간 비교 분석하였다. 그 결과, 두 집단 간의 유의한 차이는 나타나지 않았다 [DE: $F(1,15)=1.126$, $p<.05$; HA:$F(1,15)=3.287$, $p=.091$].

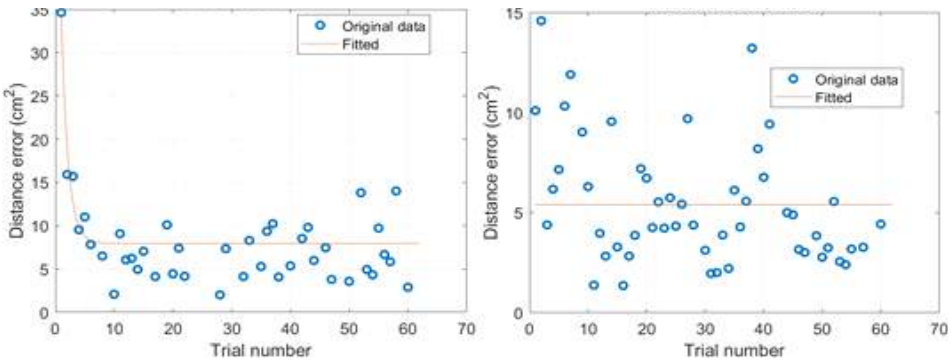


그림 34. 지수 함수(decay constant)를 활용한 각 집단의 single-subject의 적응지수(AC) 양상 (왼쪽:SE, 오른쪽:SI)

마지막으로 기준선 검사와 적응 후의 비교를 통해 감각적응 수행 후 적응의 영향이 얼마나 미치는가를 살펴보았다. 이를 위해 반복측정에 의한 이원 분산분석[집단(2수준), 시기(2수준: baseline, washout)]을 실행하였고, 그 결과, 암묵적 유도전략과 명시적 유도전략의 DE는 유의하게 커졌으

며, 암묵적 유도 학습보다 명시적 학습의 DE가 유의하게 더욱 큰 거리 오차를 나타냈다<그림35>. 따라서, 암묵적 유도전략 학습보다 명시적 유도전략 학습의 정확도가 유의하게 커 잔존효과가 지속한 것으로 보아 학습의 공고화를 더욱 증진했을 것으로 유추해 볼 수 있다.

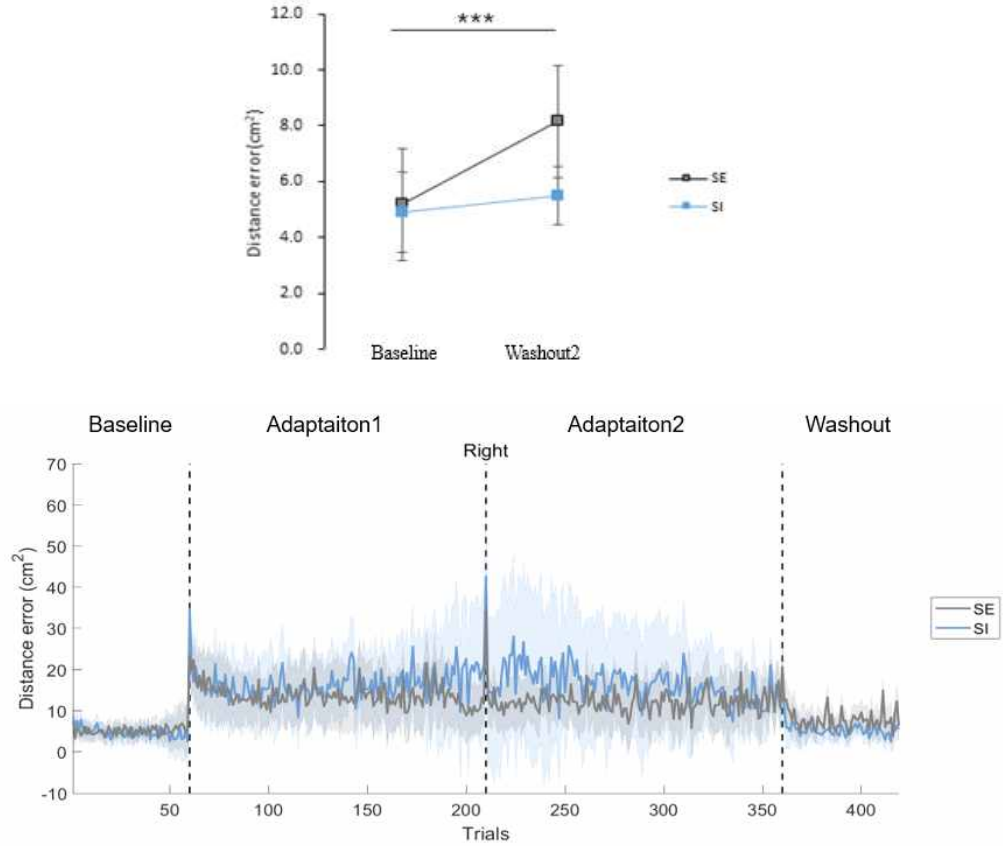


그림 35. 집단 SE와 SI의 기준선과 탈적응2 구간의 DE 비교

표 12. 집단(2수준)과 시기(2수준)에 따른 DE비교(two-way *RM* ANOVA)

변인	Sum Sq	df	Mean Sq	*F*	*P*	η^2
Group	17.562	1	17.562	13.006	0.001**	0.317
Period	25.407	1	25.407	18.816	0.000***	0.402
Group * Period	11.200	1	11.200	8.294	0.008**	0.229
오차	37.808	28	1.350			

*p<.05, **p<.01, ***p<.001

2. 소뇌 비침습 자극의 극성에 따른 지각운동 수행의 변화

1) ctDCS 극성 별 명시적 유도전략에 따른 수행 비교(3집단: AE, CE, SE)

경두개 직류 전기 자극(ctDCS)과 같이 비침습적 뇌 자극 기술이 다양한 운동 과제 수행에서 운동의 성능과 학습을 향상할 가능성이 두드러지면서 다양한 연구에서 활용되고 있으나, 명시적 및 암묵적 학습의 신경 메커니즘을 알아보고자 한 연구는 드물다. 따라서 본 연구는 ctDCS의 극성에 따른 암묵 및 명시적 유도전략 학습에 미치는 적응 양상에 대해 살펴보고자 하였다. 적응1 구간의 전(all) 시도의 RT를 집단별로 비교 분석하기 위해 일원 배치 분산분석을 시행하였고, 시간[시기(3수준: early, middle, late), 시기(2수준: initial, last)]의 흐름에 따라 집단별 적응도의 차이가 나타나는지를 확인하기 위해 반복측정에 의한 이원분산 분석을 시행하였다. MT, MS는 RT와 같은 방법으로 검정이 이루어졌고, DE, HA에 대해서는 시간[시기(2수준: initial, last)]의 흐름에 따른 집단별 유의 검정과 지각 운동과제를 시행하기에 앞서 참여자가 의도한 바가 어떠한 변화로 적응되어 가는지 확인하기 위해 에러값(양수)으로 통일하였다.

① 적응 1구간(명시적 유도 학습 전략의 ctDCS 자극 간 비교)

(1) 반응시간(RT)과 운동시간(MT)

ctDCS 자극 극성에 따른 3 집단의 운동 적응변화를 정량적으로 파악하기 위해 먼저 RT, MT를 산출하여 일원배치 분산분석을 시행하였다. RT에서 집단 간 유의한 차이가 나타났으나($p=.027^*$), MT는 유의한 차이가 나타나지 않았다($p>.05$). RT의 *Tukey HSD* 사후검증을 시행한 결과, 집단 AE와 CE의 유의한 차이가 나타났다.

표 13. 적응 1구간의 ctDCS 극성별 명시적 유도전략 집단의 RT, MT 비교

집단		표본수	평균	표준편차	*F*	*P*
RT	Anodal tDCS	8	0.56	0.14	4.069	.027*
	Cathodal tDCS	8	0.43	0.05		
	Sham tDCS	8	0.43	0.96		
MT	Anodal tDCS	8	0.84	0.24	0.436	0.938
	Cathodal tDCS	8	0.88	0.26		
	Sham tDCS	8	0.88	0.26		

*p<.05

ctDCS 자극에 따른 집단과 적응 1구간 RT의 시기별(3수준: early, middle, late) 상호작용 효과(interaction effect)를 검증하기 위해 반복측정에 의한 분산분석(RM two-way ANOVA)을 하였다. 다만, Mauchly 구형성 검정을 만족하지 못해(p=.011), Greenhouse-Geisser의 수정된 자유도 값을 참조하였다. 그 결과, 집단의 주효과는 나타났으나, 집단과 적응1 구간의 시기별 상호작용 효과는 유의하지 않았다<표13>. 집단 간 주효과에 대한 *Tukey HSD* 사후검정 결과, AE와 CE(p=.034), AE와 SE(p=.032)간의 유의한 차이가 나타났다. 따라서, 집단 간 반응시간의 차이는 나타났으나, ctDCS의 극성에 따른 시기별 RT의 차이는 없음을 알 수 있다.

표 14. 집단(3수준)과 시기(3수준)에 따른 RT 비교(two-way *RM* ANOVA)

변인	Sum Sq	df	Mean Sq	*F*	*P*
Group	0.214	2	0.107	7.058	0.002**
Period	0.009	2	0.005	0.300	0.742
Group * Period	0.005	4	0.001	0.075	0.990
오차	0.956	63	0.015		

*p<.05, **p<.01, ***p<.001

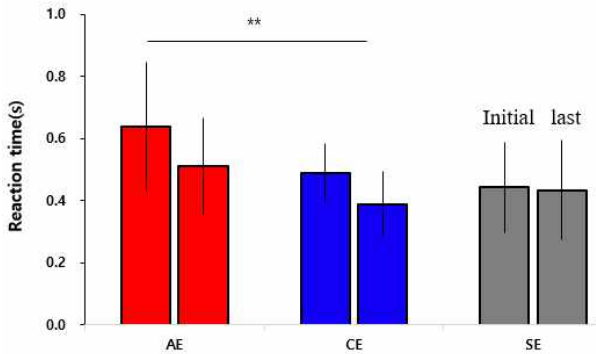


그림 36. 집단 간 시기별(2수준) RT 결과

MT는 시기(3수준: early, middle, late)의 주효과는 나타났으나(p<.01), 집단과 시기 간 상호작용 효과는 나타나지 않았다. 3집단 모두 시행을 거듭할수록 MT가 줄어드는 결과를 나타냈다.

(2) 거리오차(DE)와 초기각도(HA)

지각운동 수행을 반복함에 따라 ctDCS 자극에 따른 수행의 정확도 변화를 살펴보기 위해 DE를 산출하여 반복측정에 의한 분산분석(RM two-way ANOVA)을 하였다. 시기(2수준: initial, last)의 주효과는 나타났

으나(p<001), 집단과 시기의 상호작용 효과는 유의하지 않았다<그림39>. 따라서, ctDCS 극성에 따른 지각운동 수행의 시기별 정확도는 집단 간 유의한 차이가 없음을 나타낸다.

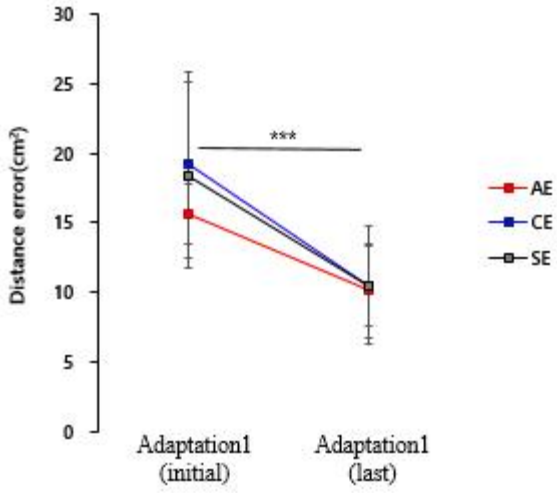


그림 37. 집단 간 시기별(initial-last) DE 결과

표 15. 집단(3수준)과 시기(2수준)에 따른 DE 비교(two-way *RM* ANOVA)

변인	Sum Sq	df	Mean Sq	*F*	*P*	η^2
Group	35.481	2	17.741	0.807	0.453	0.037
Period	651.858	1	651.858	29.648	0.000***	0.414
Group * Period	23.092	2	11.546	0.525	0.595	0.024
오차	923.422	42	21.986			

*p<.05, **p<.01, ***p<.001

② 적응 1구간

(1) 헤딩각도(HA)

다음은 적응1 구간의 집단 간 시기별(2수준: initial-last) HA 차이를 확인하고자 반복에 의한 이원분산 분석을 시행하였다. 그 결과, 집단의 주효과와 시기의 주효과는 유의하였으나<표17>, 집단과 시기의 상호작용 효과는 나타나지 않았다<표19>. 3 집단의 주효과에 대한 *Tukey HSD* 사후검정 결과, 집단 AE와 CE에서 유의한 차이가 나타났다. 산출된 HA 값은 HA의 error에 대한 값으로, 목표한 궤적으로부터 벌어진 정도를 파악하였으며, 헤딩 방향(각도)에 따른 결과는 다음 <표16>과 같다.

표 16. 시기(3수준: early, middle, late)별 음수와 양수의 빈도 분석

	Negative #	early	middle	late
AE	45.4%	18%	14.7%	12.7%
CE	34.7%	6%	14%	14.7%
SE	5.5%	2.1%	2.1%	1.3%

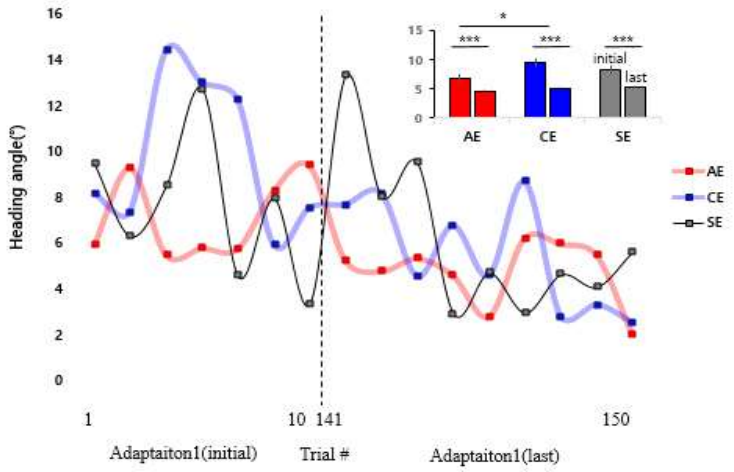


표 17. 집단(3수준)과 시기(2수준)에 따른 HA 비교(two-way *RM* ANOVA)

변인	Sum Sq	df	Mean Sq	*F*	*P*
Group	61.429	2	30.715	3.801	0.030*
Period	251.249	1	251.249	31.094	0.000***
Group * Period	6.023	2	3.012	0.373	0.691
오차	339.370	42	8.080		

*p<.05, **p<.01, ***p<.001

③ 탈적응 1구간(Washout 1)

(1) 거리오차(DE)

적응1 구간을 마친 후 외력을 제거하여 실시한 탈적응 1구간에서는 DE의 집단(3수준: AE, CE, SE) 간 시기(2수준: late, all)의 상호작용 효과가 나타났다. *Tukey HSD*의 사후검정을 한 결과, 집단 CE와 SE 간의 유의한 차이가 나타났다(p<.001). 또한, 집단 간 시기별 비교 결과, CE는 탈적응 구간 초기(early)에서 AE와 SE와의 유의한 차이를 나타냈다. 따라서, CE는 적응1 구간을 학습한 후에도 다른 집단에 비해 변화 없는 거리 오차를 보였으며, 이는 적응1 구간에서 다른 집단에 비해 학습의 영향이 비해 덜 미쳤다는 것을 알 수 있다<그림39>.

표 18. 집단과 시기에 따른 DE비교(two-way *RM* ANOVA)

변인	Sum Sq	df	Mean Sq	*F*	*P*	η^2
시기	161.31	2	80.655	8.925	<.001***	0.235
집단	291.646	2	145.823	16.136	<.001***	0.358
집단*시기	92.324	4	23.081	2.554	0.048*	0.15
오차	524.136	58	9.037			

*p<.05, **p<.01, ***p<.001

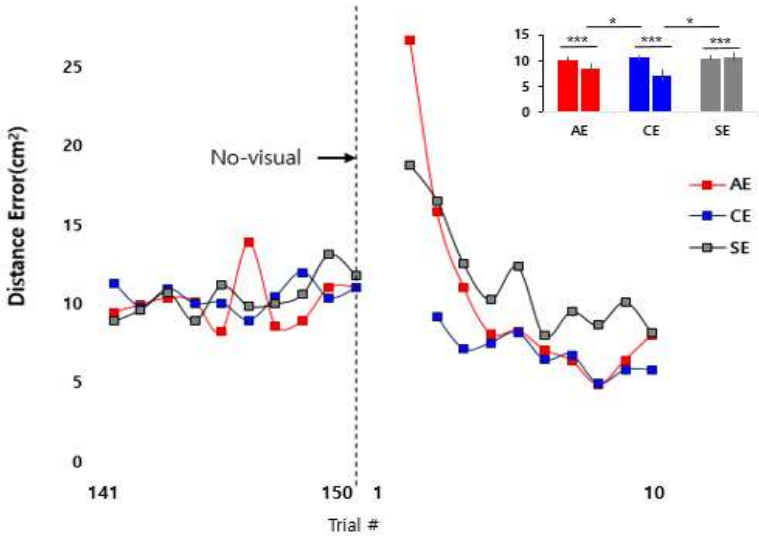


그림 39. 집단별 적응1 구간(last)와 탈적응1 구간 간(all) 비교

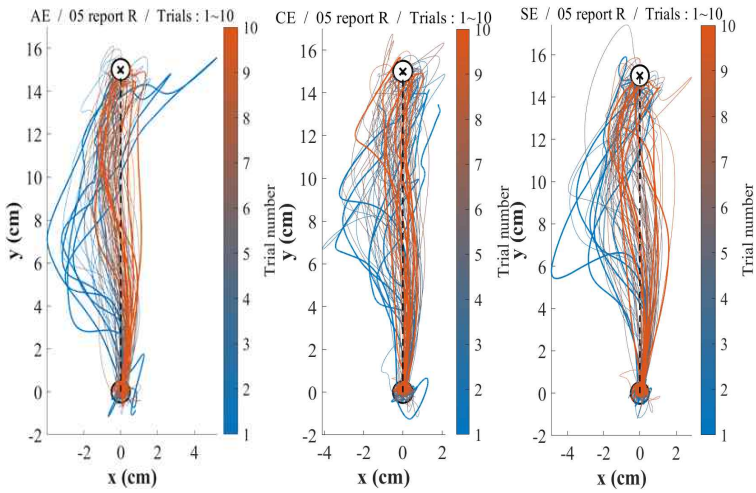


그림 40. AE, CE, SE(왼쪽부터) 집단의 탈적응 구간 수행의 양상

표 19. 각 집단의 탈적응 1구간 시기별(3수준) DE 기술 통계량

구 분		기술 통계량		
		N	평균(M)	표준편차(SD)
AE	Early	8	14.29	4.66
	Middle	8	7.85	1.86
	Late	8	6.30	1.79
CE	Early	8	7.86	1.36
	Middle	8	6.62	4.34
	Late	8	6.11	1.90
SE	Early	8	14.28	3.87
	Middle	8	9.66	4.49
	Late	8	8.92	1.71

④ 적응 2구간

(1) 반응시간(RT)과 운동시간(MT)

적응 2구간에서는 집단 간 RT 및 MT의 유의한 차이가 있는지를 검정하기 위해 일원배치 분산분석을 시행하였다. 그 결과, 집단 모두 RT와 MT의 유의한 차이가 없었다. 다음, 집단(3수준)과 시기(3수준: early, middle, late)의 상호작용을 살펴보기 위해 반복측정에 의한 이원 분산분석을 시행하였다. 집단의 주효과[$F(2,63)=7.261$, $p=0.001$, $\eta^2=.187$]는 나타났으나, 시기와의 상호작용 효과는 나타나지 않았다. 사후검정 *Tukey HSD*을 통해 AE와 CE($p=.018$) AE와 SE($p=.001$) 유의하게 나타난 것을 확인하였다. AE가 CE, SE 집단보다 상대적으로 느린 반응속도를 나타냈으며, 적응2 구간 내에서의 집단별 시기에 따른 MT의 상호작용 효과는 나타나지 않았다.

(2) 거리오차(DE)와 헤딩각도(HA)

다음 DE의 집단 주효과는 나타났으나[$F(2,63)=4.507$, $p=.015$, $\eta^2=.125$], 시기와의 상호작용 효과는 나타나지 않았다. 집단의 주효과에 따른 사후 검증 결과, AE와 CE 간의 유의한 차이가 나타났다($p=.004$). 따라서, 적응 2구간에서는 양극을 처치한 집단이 음극을 처치한 집단에 반해 DE(거리오차)가 적어 지각운동 수행의 적응(학습)과정에서 나타나는 수행의 정확도가 상대적으로 높은 것으로 나타났다.

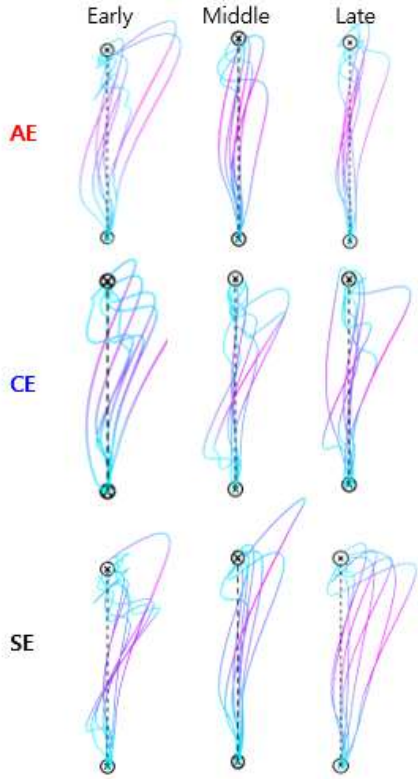


그림 41. 집단 AE, CE, SE의 적응2 구간의 수행 변화

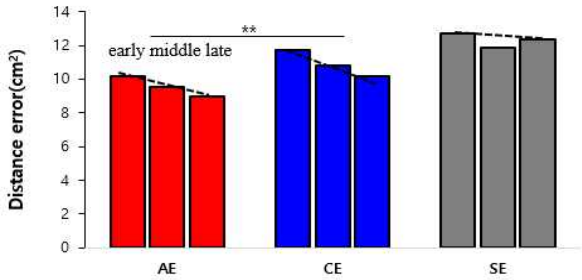


그림 42. 적응2 구간의 집단 간 수행 정확도 비교(ED)

HA 또한 집단의 주효과만 나타났으며[F(2, 63)=4.238, p=.019, η^2=.119], LSD 사후검증을 통해 집단 AE와 CE(p=.039), SE(p=.007) 간의 유의한 차이가 나타났다는 것을 확인할 수 있었다<그림43>.

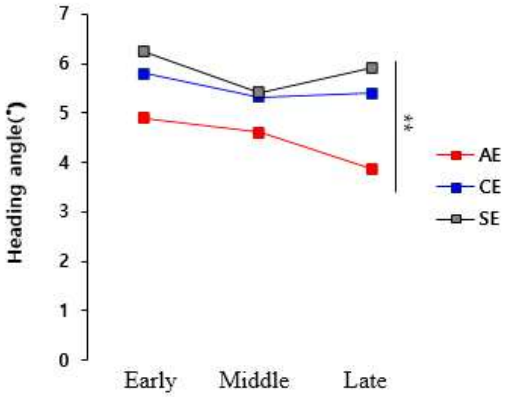


그림 43. 적응 2구간의 집단 간 HA 비교

(1) 최대속도(MS)

각 집단(3수준: AE, CE, SE) 간 시기(2수준: initial-last)에 따라 지각운동 과제의 수행 변화를 비교 분석하기 위해 MS를 산출하여 반복측정에 의한 이원분산분석(two-way *RM* ANOVA)을 실시하였다. 분석 결과, 시기의 주효과는 나타났으나[F(1,42)=5.910, p=.019, =.123], 상호작용 효과는 나타나지 않았다. *Tukey HSD*의 사후검정 결과, 집단 CE는 AE와 SE와 유의한 차이를 나타냈다(AE,p=.034, SE,p=.035)<그림44>.

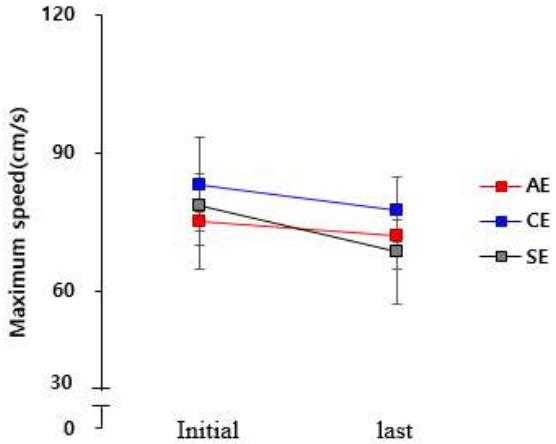


그림 44. 적응 2구간의 집단 간 시기에 따른 MS 비교

⑤ 적응 1구간과 2구간 비교

(1) 집단 내 지각운동 수행의 변화

각 집단 내 지각운동 수행의 연습 시기에 따라 학습된 정도의 차이가 있는지 알아보기 위해 적응 1구간과 2구간의 대응표본 *t*-검정(paired *t*-test)을 실시하였다. 그 결과, AE 집단은 MS를 제외한 나머지 수행 요인에서 모두 유의한 수준을 나타내었고<표20>, CE 집단은 HA를 제외한 나머지 수행 요인에서 모두 유의한 수준을 나타내었다<표21>. 마지막으로 SE 집단은 RT와 MT 유의수준 0.05를 기준으로 통계적으로 유의하게 나타났다<표.7 참고>. 따라서, 적응 1구간과 2구간의 지각운동 수행을 거치며 AE 집단은 MS에서 CE는 HA에서 유의한 변화를 보이지 않아, 수행을 거듭하여도 ctDCS의 극성에 따라 조금씩 다른 수행 변화를 나타낸다는 것을 알 수 있다.

표 20. AE 집단 내 RT와 MT 대응표본 *t*-검정 결과

구 분			기술 통계량			*t(p)*
			N	평균(M)	표준편차(SD)	
AE	RT	adaptation 1	8	0.56	0.14	<.001***
		adaptation 2	8	0.49	0.14	
	MT	adaptation 1	8	0.84	0.27	0.008**
		adaptation 2	8	0.67	0.17	
	HA	adaptation 1	8	5.13	1.58	0.011*
		adaptation 2	8	4.45	1.42	
	DE	adaptation 1	8	11.72	3.25	0.001**
		adaptation 2	8	9.56	2.87	

*p<.05, **p<.01, ***p<.001

표 21. CE 집단 내 RT와 MT 대응표본 *t*-검정 결과

구 분			기술 통계량			*t(p)*
			N	평균(M)	표준편차(SD)	
CE	RT	adaptation 1	8	0.43	0.06	0.04*
		adaptation 2	8	0.41	0.07	
	MT	adaptation 1	8	0.88	0.25	0.008**
		adaptation 2	8	0.74	0.21	
	DE	adaptation 1	8	12.86	3.58	0.026*
		adaptation 2	8	10.91	2.97	
	MS	adaptation 1	8	80.37	12.47	0.05*

*p<.05, **p<.01, ***p<.001

(2) 집단 간 시기에 따른 지각운동 수행의 변화

앞서 명시적 유도전략과 암묵적 유도전략의 학습은 적응1, 2 구간(6수준: 시기(early, middle, late)에 따른 집단 비교 분석이 이루어졌다. 이 장, 명시적 유도전략의 적응 1구간과 2구간의 비교에서는 각 집단에 따른 시기(2수준:initial, last)별 수행 요인 분석을 위해 반복측정에 의한 이원 분산분석을 시행하였다. 그 결과, 집단과 시기의 주효과는 나타났으나[RT 집단:$F(2, 84)=7.923$, $p<.001$, $\eta^2= .159$; RT 시기:$F(3,84)=3.004$, $p=.035$, $\eta^2=.097$], 둘의 상호작용 효과는 나타나지 않았다. 집단에 따른 *Tukey HSD* 사후검정 결과, AE와 CE($p=.002$), AE와 SE($p=.003$)으로 집단 간 유의한 차이가 나타났으며, AE와 CE의 적응1 구간의 initial과 적응 2구간 initial에서 유의한 차이가 나타났다($p<.05$). AE와 SE는 적응 1구간 initial에서만 유의한 차이가 나타났다($p<.01$). 따라서, ctDCS anodal이 처치된 집단의 지각운동 수행의 RT가 다른 집단과 비교해 느린 것을 알 수 있다.

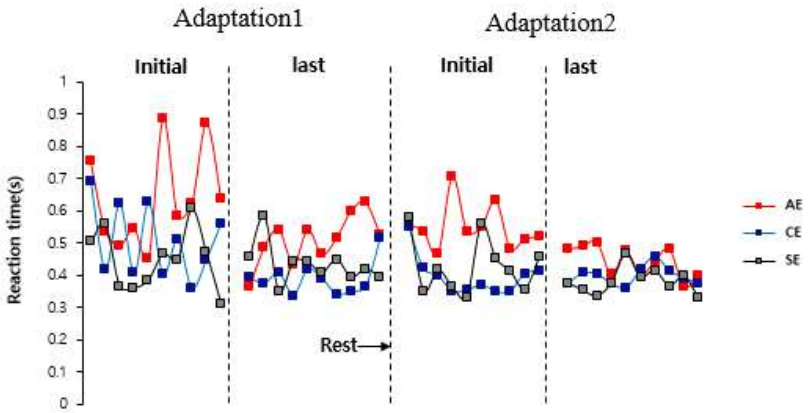


그림 45. 집단 별 적응 1구간(initial-last) 2구간(initial-last)의 RT

MT의 경우, 시기의 주효과[시기:$F(3,84)=9.033$, $p<.001$, $\eta^2=.244$]만 나타나고, 집단과 시기의 상호작용 효과는 나타나지 않아, 명시적 유도전략 집단의 ctDCS 적용에도 MT는 비슷하다는 것을 알 수 있다<그림46>.

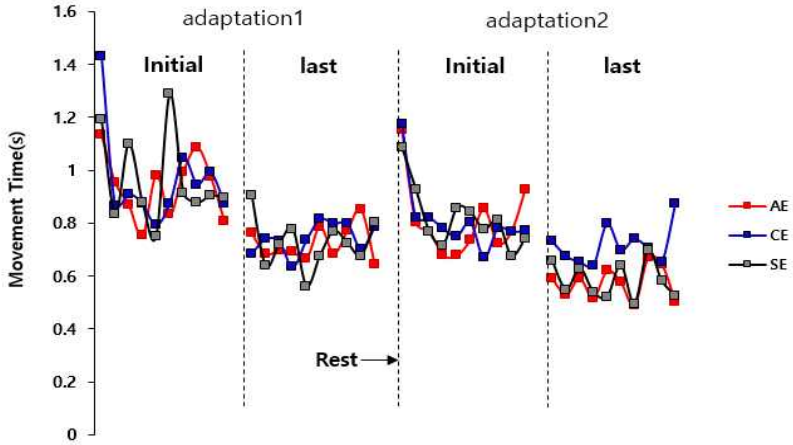
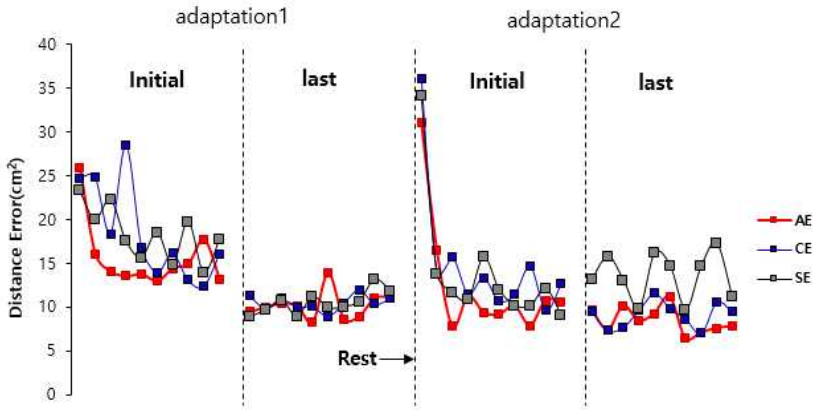


그림 46. 집단 별 적응 1구간(initial-last) 2구간(initial-last)의 MT

다음은 DE와 MS를 산출하여, 반복측정에 의한 이원분산분석을 시행하였다. DE와 MS의 시기 주효과는 유의하였으나[DE: $F(3.84)=16.423$, $p<.001$, $\eta^2=.370$, MS: $F(3.84)=11.482$, $p<.000$, $\eta^2=.291$], 집단별 시기에 따른 상호작용 효과는 나타나지 않았다. 따라서 명시적 유도전략 집단은 (AE, CE, SE) 연습을 거듭할수록, 수행의 거리오차와 최대속도는 점점 줄어들었으며 ctDCS에 따른 유의한 차이는 나타나지 않아, ctDCS의 극성에 따른 집단의 시기별 변화에 차이가 없는 것으로 파악된다.



마지막으로, HA의 집단별 시기에 따른 유의한 차이가 있는지를 검정하기 위해 반복측정에 의한 이원분산분석을 시행하였다. 분석 결과, 집단과 시기에 따른 주효과는 나타났으나, 상호작용 효과는 나타나지 않았다 <표22>. 집단 AE와 SE, CE와 유의한 차이가 나타났으며, 시기에 따라 헤딩각도는 줄어들었다.

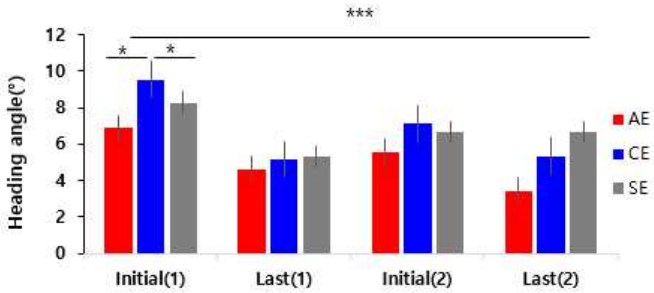


그림 48. 집단별 적응 1, 2구간의 HA

표 22. 집단(3수준)과 시기(2수준)에 따른 HA비교(two-way *RM* ANOVA)

변인	Sum Sq	df	Mean Sq	*F*	*P*	η^2
Group	56.780	2	28.390	4.533	0.014*	0.097
Period	158.771	3	52.924	8.451	0.000***	0.232
Group * Period	26.253	6	4.375	0.699	0.651	0.048
오차	526.066	84	6.263			

*p<.05, **p<.01, ***p<.001

표 23. 집단별 시기에 따른 지각운동 수행과정의 요인별 특징

Performance variables	AE		CE		SE	
	적응 1	적응 2	적응 1	적응 2	적응 1	적응 2
RT	느린 반응/느린 반응		빠른 반응			
MT	시기에 따라 줄어듦/ 집단 간 유의한 차이 없음					
HA	작음/줄어듦		AE보다 유의하게 오차 큼			
DE	다른 집단에 비해 높음(2)		시기에 따라 정확도 높아짐			
MS	시기에 따라 줄어듦/ 집단 간 유의한 차이 없음					

⑥ 탈적응 2구간

(1) 반응시간(RT), 운동시간(MT)과 최대속도(MS)

탈적응 구간에서는 RT, MT, MS의 집단(3수준: AE, CE, SE)간 시기(2수준: adaptation2-late, washout-all)에 따른 차이를 검증하기 위해 실시된 이원 분산 분석 결과, 세 변인 모두 시기의 주효과는 나타났으나[RT: $F(1,42)=1340.657$, $p<.001$, $\eta^2=$ 970], [MT 시기: $F(1,42)=48.720$, $p<.001$,$\eta^2=.537$][MS 시기: $F(1,42)=283.301$, $p<.001$, $\eta^2=$ 871, 상호작용 효과는 나타나지 않았다.

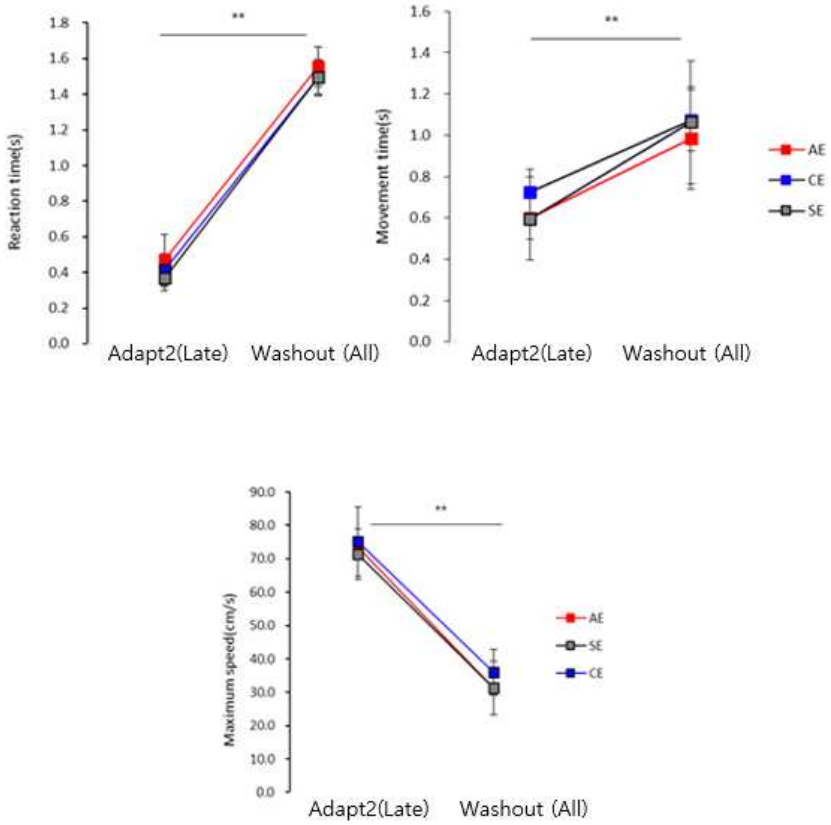


그림 49. 집단별 시기에 따른 탈적응 정도 (RT, MT, MS)

(2) 거리오차(DE)와 헤딩각도(HA)

각 집단(3수준) 간 시기(2수준: 적응 2구간(late)-탈적응 구간(washout))에 따라 지각운동과제의 수행 정확도를 비교 분석하기 위해 집단의 시기별 DE를 산출하여 반복측정에 의한 이원분산분석(two-way *RM* ANOVA)을 시행하였다. 분석 결과, 집단의 주효과 및 시기의 주효과는 나타났으나 [집단:$F(2,42)=5.492$, $p<.008$, $\eta^2=.207$],[시기:$F(1,42)=28.098$, $p<.001$, $\eta^2=.401$], 상호작용 효과는 나타나지 않았다. *Tukey HSD* 사후검정 결과, 집단 SE는 AE, CE와 유의한 차이를 나타냈다<그림51>. HA는 집단의 주효과만 나타났으며[집단:$F(2, 42)=5.519$, $p<.007$, =.208] 사후검정 결과, 집단 AE와 SE의 유의한 차이가 나타났다($p=.006$).

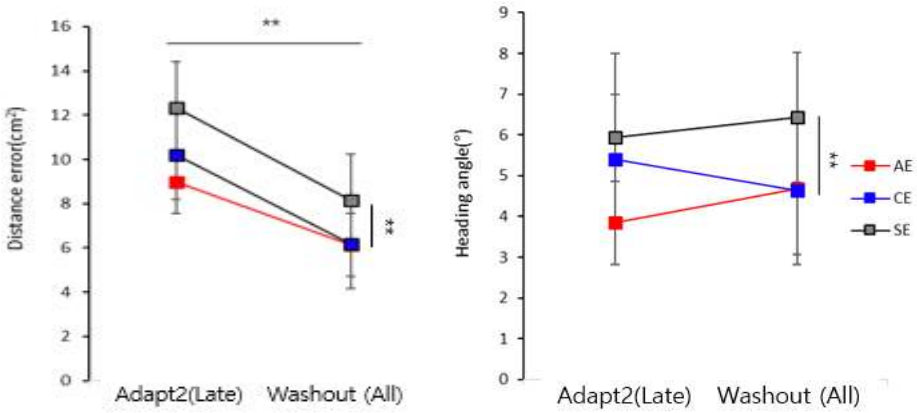


그림 50. 집단별 시기에 따른 탈적응 정도(RT, MT, MS)

표 24. 집단과 시기에 따른 DE 비교(two-way *RM* ANOVA)

변인	Sum Sq	df	Mean Sq	*F*	*P*	η^2
집단	156.750	2	78.375	1.124	0.335	0.051
시기	19753.345	1	19753.345	283.301	0.000***	0.871
집단*시기	19.837	2	9.919	0.142	0.868	0.007
오차	2928.479	42	69.726			

*p<.05, **p<.01, ***p<.001

수행의 정확도를 판단하는 수행 요인, DE(적응 2구간의 DE와 탈적응 구간의 DE의 오차)를 산출하여 집단 간 비교 분석을 위해 일원 배치 분산분석을 시행하였으나, 집단 간 유의한 차이는 나타나지 않았다(p>.05).

(3)적응지수(AC)

지각운동 적응의 변화를 정량적으로 파악하기 위해 DE와 HA 각도의 값을 지수 감소 함수(exponential decay function)에 적용하여, 적응 2구간의 last 구간 값의 평균값을 기준값으로 정하고, 적응구간에서 이 기준값에 도달하는데 걸리는 적응 조건이 이 기준값에 도달하는데 걸리는 적응 조건의 비율을 적응 정도로 산출하여 집단 간 비교 분석하였다. 그 결과, DE와 HA 모두 통계적으로 유의하지 않았다(p>.05).

ctDCS 극성에 따른 명시적 유도 학습 전략 비교의 마지막으로 기준선 검사와 적응 후의 비교를 통해 감각적응 수행 후 적응의 영향이 얼마나 미치는가를 살펴보았다. 이를 위해 반복측정에 의한 이원 분산분석(집단(2수준), 시기(2수준: baseline, washout))을 실행하였고, 그 결과, 시기의 주효과는 나타났으나, 집단 간 유의한 차이는 나타나지 않았다. 따라서, 감각적응은 유의하게 남아있으나, ctDCS의 극성에 따른 집단 간 학습의 공고화에는 유의한 차이가 없는 것으로 판단된다.

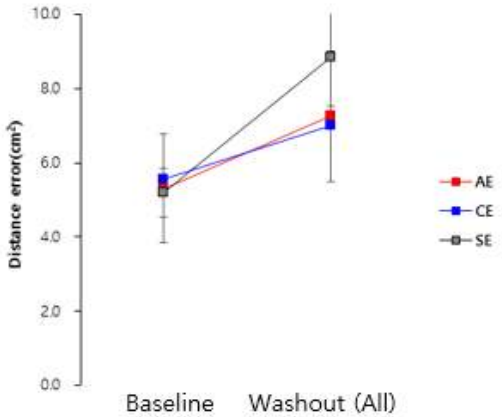


그림 51. 기준선 검사와 탈적응 구간 DE 비교

표 25. 집단(2수준)과 시기(2수준)에 따른 DE비교(two-way *RM* ANOVA)

변인	Sum Sq	df	Mean Sq	*F*	*P*	η^2
Group	17.562	1	17.562	13.006	0.001**	0.317
Period	25.407	1	25.407	18.816	0.000***	0.402
Group * Period	11.200	1	11.200	8.294	0.008**	0.229
오차	37.808	28	1.350			

*p<.05, **p<.01, ***p<.001

2) ctDCS 극성 별 지각운동 수행의 왼손 전이 효과(3집단: AE, CE, SE)

왼손 지각운동과제는 명시적 유도 학습으로 적응된 오른손을 왼손 지각운동과제에서 얼마나 명시적으로 구현해 낼 수 있는지를, ctDCS의 자극 극성에 따라 살펴보고자 하였다. 오른손 지각운동 수행이 끝난 후, 왼손 지각운동과제를 수행하였으며, 왼손 수행 시에는 오른손에 주어진 외력의 크기와 같은 힘의 크기가 주어질 것이라는 사전적 지시가 주어졌다.

① 기준선 검사 구간

기준선 검사는 집단 간 지각운동과제의 왼손 기본 수행 능력을 검증하고자 먼저 RT, MT, HA, ED, MS를 계산하여 일원 분산분석(one-way ANOVA)을 시행하였으나, 모두 유의하지 않아 집단 간 왼손의 기본적인 뻗기 능력에는 차이가 없음을 나타냈다<표 26>.

표 26. 모든 집단의 왼손 기준선 검사의 일원배치 분산분석 결과

구분		반응시간(RT) / 운동시간(MT)				
		N	Mean	SD	*F*	*P*
Baseline 기준선 검사	AE	8	1.51	0.08	0.083	.987
	CE	8	1.50	0.08		
	SE	8	1.51	0.06		
	AE	8	1.02	0.29	0.560	.693
	CE	8	0.95	0.27		
	SE	8	0.95	0.23		

② 적응 1구간

(1) 반응시간(RT)과 운동시간(MT)

3 집단의 왼손 지각운동 수행의 적응과정을 살펴보기 위해 산출된 RT, MT, HA, DE, MS로 각 집단의 평균 차이를 검증하기 위해 일원 배치 분산분석을 시행하였다. 그 결과, 집단 간의 유의한 차이를 나타내지 않았다. 집단별(3수준: AE CE, SE) 적응구간의 시기(3수준: early, middle, late)에 따른 변화를 비교 분석하기 위해 반복측정에 의한 이원 분산분석을 시행하였다. 그 결과, RT는 집단에서[RT집단:$F(2,63)=5.143$, $p<.009$, $\eta^2=.607$], MT는 시기의 주효과가 나타났다[MT시기:$F(2,63)=4.126$, $p<.021$, $\eta^2=.108$]. 그러나, RT, MT 모두 상호작용 효과는 나타나지 않았다. RT에 대한 *Tukey HSD* 사후 검정 결과, 집단 AE와 CE, SE와의 유의한 차이가 나타났다(RT: $p=.038$, $p=.011$).

(2) 거리오차(DE), 헤딩각도(HA)와 최대속도(MS)

DE는 시기의 주효과는 나타났으나[DE 집단:$F(2,63)=9.770$, $p<.001$, $\eta^2=.237$], 집단과의 상호작용 효과는 나타나지 않았고, HA는 집단의 주효과 및 시기의 주효과는 나타났으나, 집단과 시기의 상호작용 효과는 나타나지 않았다[HA 집단:$F(2,63)=4.984$, $p=.01$, $\eta^2=.137$; HA 시기:$F(2,63)=7.262$, $p<.001$, $\eta^2=.187$]. 집단의 주효과를 사후검정을 통해 확인한 결과, 집단 AE와 CE간의 유의한 차이가 나타났다.

마지막으로, MS는 집단 및 시기의 주효과는 나타났으나, 집단과 시기간의 상호작용 효과는 나타나지 않았다[집단:$F(2,63)=4.302$, $p=.018$, $\eta^2=.120$; 시기:$F(2,63)=5.894$, $p=.005$, $\eta^2=.158$]. 집단의 사후검정 결과, 집단 AE와 SE($p=.016$) 유의한 차이를 나타냈다.

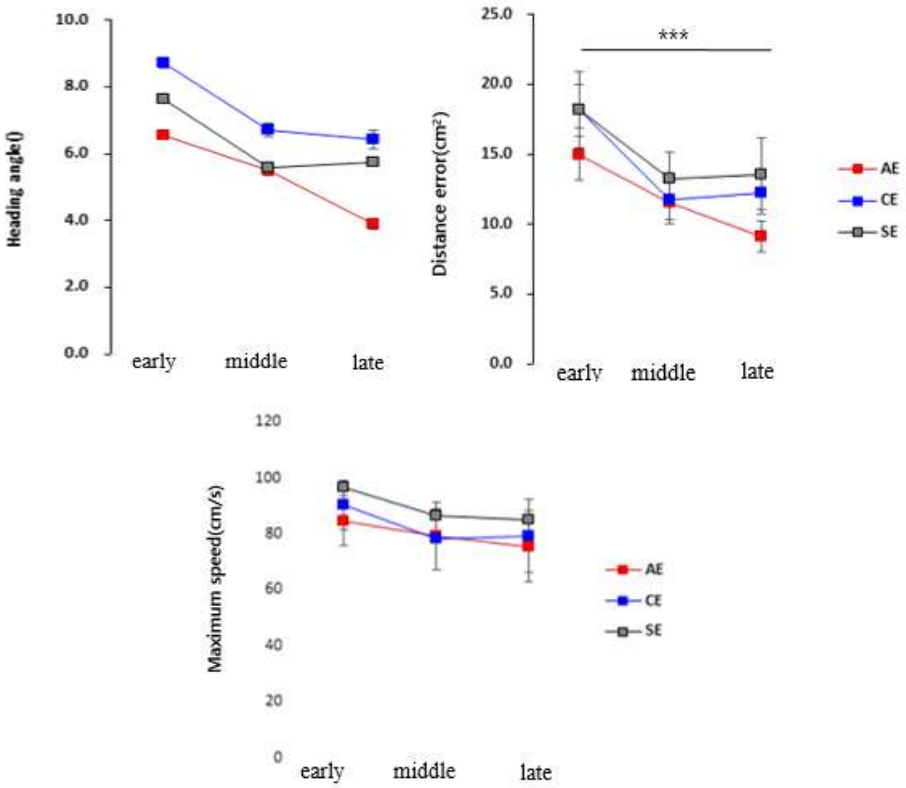


그림 54. 적응 1구간의 집단 간 시기별 HA, DE, MS 변화 양상

(3) 오른손 왼손 비교

ctDCS의 극성에 따른 왼손의 전이 정도를 파악하기 위해 적응 1구간에 대한 오른손 왼손의 RT 비교 분석을 위해 반복측정에 의한 이원분산분석을 시행하였다. 그 결과, 집단[F=(2, 42)=6.323, p=.004, η^2=.231]과 전이(transfer)의 주효과는 나타났으나[F=(1, 42)=5.744, p=.021, η^2=.120], 상호작용 효과는 나타나지 않았다. 적응 1구간은 RT를 포함하여 모든 수행변인에서 집단과 오른손 왼손의 상호작용 효과는 나타나지 않았다. RT의 대한 *Tukey HSD* 사후검정 결과, 집단 AE와 SE, CE간 유의한 차이가 나타났다(p<.05).

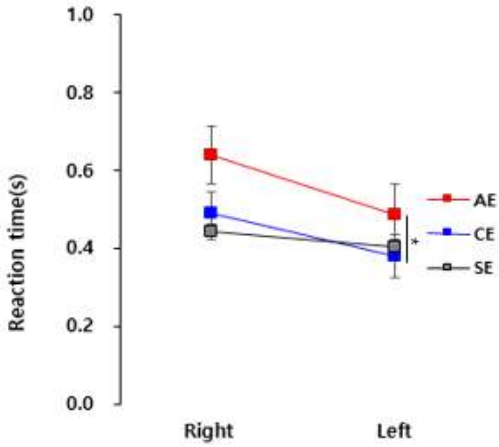


그림 55. 왼손 오른손의 전이 양상(RT)

③ 탈적응 1구간

(1) 거리오차(DE)

집단(3수준:AE, CE, SE) 간 시기별(적응 1구간(last)-washout 1구간(all)) 지각운동의 정확성 차이를 검증하기 위해, 반복측정에 의한 이원분산분석을 시행하였다. 분석 결과, DE의 시기 주효과는 나타났으나[DE 시기:$F(1,42)=22.051$, $p<.001$, $\eta^2=.344$] 집단과의 상호작용은 나타나지 않았다. ctDCS 자극 별 적응 1구간의 적응(학습)은 탈적응 1구간에서 SE와 AE, CE간의 유의한 변화를 가져왔으나, 이는 거리오차가 갑작스런 섭동에도 불구하고 SE가 다른 집단에 비해 DE가 더욱 작아진 것이므로, 집단의 학습효과가 다른 집단에 비해 더 적었음을 유추해 볼 수 있다.

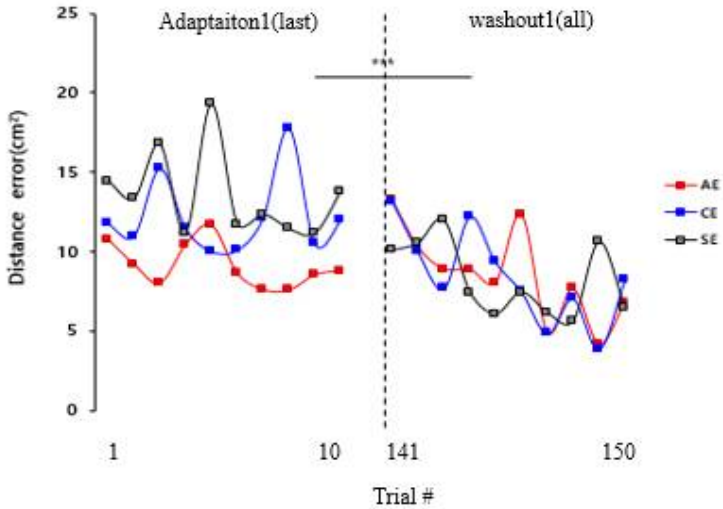


그림 56. 적응 1구간에 따른 탈적응 1구간의 수행 양상

표 27. 집단과 시기에 따른 DE비교(two-way *RM* ANOVA)

변인	Sum Sq	df	Mean Sq	*F*	*P*	η^2
집단	49.944	2	24.972	1.671	0.2	0.074
시기	329.569	1	329.569	22.051	<.001***	0.344
집단*시기	33.362	2	16.681	1.116	0.337	0.05
오차	627.715	42	14.946			

*p<.05, **p<.01, ***p<.001

(2) 오른손 왼손 비교

ctDCS의 극성에 따른 왼손의 전이 정도를 파악하기 위해 집단(3수준: AE, CE, SE)과 전이(2수준: 오른손, 왼손) 시기별(2수준: adaptation 1(last)-washout 1(all))의 삼원분산분석(three-way ANOVA)결과, DE의 시기 주효과만 나타났다[F(1,84)= 15.248, p=001, =.154]. 시기의 주효과에 대한 *Tukey HSD*

사후검정 결과, 모든 집단에서 오른손-왼손 시기에 따른 유의한 변화가 나타났다(p=.001).

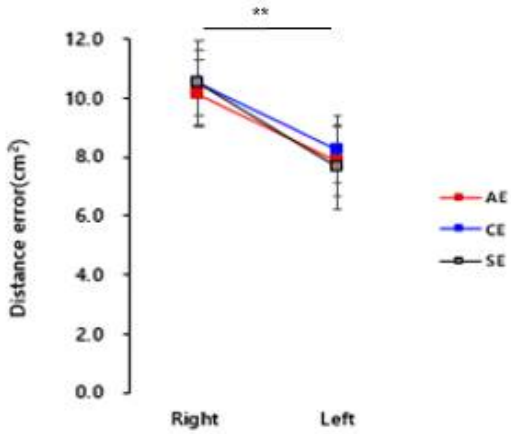


그림 57. 탈적응 1구간의 오른손 왼손의 DE

④ 적응 2구간

(1) 반응시간(RT)과 운동시간(MT)

집단별 시기에 따른 지각운동 수행의 차이가 있는지를 검증하기 위해 반복측정에 의한 이원분산분석을 시행하였다. 먼저 RT의 분석 결과, 집단의 주효과는 나타났으나[RT 시기:F(2,63)=4.431, p=.016, η^2=.123], 시기와의 상호작용 효과는 나타나지 않았으며, MT는 집단과 시기 모두 유의하지 않았다. RT의 집단의 *Tukey HSD* 사후검정 결과, 집단 AE와 SE, CE간의 유의한 차이가 나타났다(AE&SE: p=.48, AE&CE: p=.23).

(2) 거리오차(DE)와 헤딩각도(HA)

적응 2구간의 집단별(3수준:AE, CE, SE) 시기(3수준:early, middle, late)에 따른 DE와 HA의 반복측정에 의한 분산분석 결과 집단의 주효과는 나타났으나[DE 집단: F(2,63)=3.231, p<.046, =093][HA 집단: F(2,63)=3.912, p=.025, =110] 상호작용 효과는 유의하지 않았다. DE와 HA는 AE와 SE

의 집단 간 차이가 유의하게 나타났다(DE: p=.036, HA: p=.035)를 나타냈다.

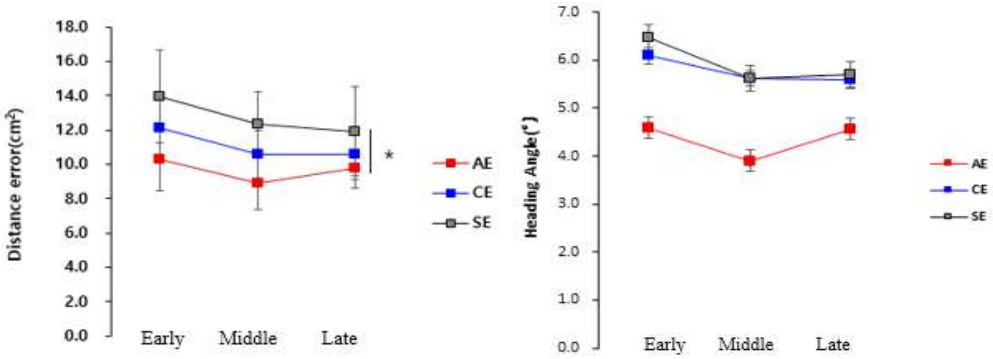


그림 58. 집단의 왼손 적응 2구간의 DE와 HA

⑤ 적응 1구간과 2구간 비교

(1) 집단 내 지각운동 수행의 변화

AE 집단은 RT를 제외한 모든 수행 요인에서 유의한 차이를 나타냈으며, CE의 경우 RT와 MT를 제외한 모든 수행 요인에서 유의한 차이가 나타났다. SE는 MT, DE, MS에서 유의한 차이를 나타냈다<표28>.

(2) 집단 간 시기에 따른 지각운동 수행의 변화

ctDCS의 극성에 따른 왼손의 전이 정도를 파악하기 위해 집단(3수준: AE, CE, SE)과 전이(2수준: 오른손, 왼손) 시기별(2수준: adaptation1(last)-washout1(all))의 삼원분산분석 결과, 집단의 주효과만 나타났다[RT 집단: F(2,84)=4.961, p<.009, η^2=.106]. 사후검정 결과, 집단 AE와 CE, SE 간의 유의한 차이가 나타났다. MT 시기의 주효과는 나타났으나, 상호작용 효과는 나타나지 않았다[MT 시기: F(1,84)=12.962, p<.001, η^2=.134]. HA는 집단과 시기의 주효과는 나타났으나[HA 집단: F(2,84)=5.671, p=.005, η^2=.119; HA 시기:F(2,84)=5.120, p=.026, =.057], 집단과 시기, 전이의 상호작용 효과는 나타나지 않았다. *Tukey HSD* 사후검정 결과, AE와 CE의 유의한 차이가 적응 1구간과 2구간

에서 나타났다.

DE에서는 집단과 시기의 주효과는 나타났으나[집단: $F(2,84)=4.885$, $p=.010$, $\eta^2=.104$; 시기: $F(2,84)=12.297$, $p<.001$, $\eta^2=.128$] 상호작용은 나타나지 않았다. 오른손 적응 2구간의 AE와 SE, CE와 SE 간의 유의한 차이가 나타났다. 마지막으로 MS는 집단과 시기의 주효과는 나타났으나, 상호작용 효과는 나타나지 않았다[MS 집단: $F(2,84)=4.663$, $p=.012$, $\eta^2=.100$; MS 시기:$F(2,84)=12.460$, $p<.001$, $\eta^2=.308$]. 각각의 주효과를 사후 검정을 통해 확인한 결과, 집단 SE와 AE간의 유의한 차이가 나타났고($p=.010$) 두 집단의 시기는 모두 유의하게 나타났다.

표 28. 각 집단 내 대응표본 *t* 검정 결과

구 분			기술 통계량			*t(p)*
			N	평균(M)	표준편차(SD)	
AE	MT	adaptation 1	8	0.69	0.12	2.710(0.030*)
		adaptation 2	8	0.65	0.13	
	HA	adaptation 1	8	5.58	1.38	3.664(0.008**)
		adaptation 2	8	4.31	0.99	
	DE	adaptation 1	8	12.39	3.84	4.770(0.002**)
		adaptation 2	8	9.63	2.77	
	MS	adaptation 1	8	80.58	10.49	3.409(0.011*)
		adaptation 2	8	76.75	10.61	
CE	HA	adaptation 1	8	7.44	2.077	2.800(.027)
		adaptation 2	8	5.80	2.073	
	DE	adaptation 1	8	14.35	492.40	3.969(.005)
		adaptation 2	8	11.17	358.97	
	MS	adaptation 1	8	83.26	12.51	3.733(.007)
		adaptation 2	8	77.32	11.26	
SE	MT	adaptation 1	8	0.73	0.16	3.276(0.014*)
		adaptation 2	8	0.65	0.14	
	ED	adaptation 1	8	0.16	4.50	5.193(0.001***)
		adaptation 2	8	0.14	4.80	
	MS	adaptation 1	8	90.34	9.98	5.568(<.001***)
		adaptation 2	8	82.40	7.21	

⑥ 탈적응 2구간

(1) 반응시간(RT)과 운동시간(MT)

집단별 반응시간 비교를 위해 적응2 구간의 후기(late)와 탈적응 구간(washout)의 RT와 MT를 산출한 후, 이원 분산분석을 시행하였다. 먼저 RT는 시기의 MT는 집단의 주효과가 유의하게 나타났으나[RT 시기: $F(1,42)=26.946$, $p<.001$, =.391; MT 시기:$F(1,42)=15.119$, $p<.001$, =.265], 집단과의 상호작용 효과는 나타나지 않았다. 따라서, 적응 1, 2구간을 거쳐 적응(학습)된 움직임에서 ctDCS의 극성에 따른 수행 변인의 차이가

없는 것으로 판단된다.

(2) 거리오차(DE)와 헤딩각도(HA)

DE와 HA, MS 모두 시기의 주효과가 유의하게 나타났으나[DE 시기: $F(1,42)=26.946$ $p<.001$, $\eta^2=.391$; MT 시기:$F(1,42)=4.891$, $p<.032$, $\eta^2=.104$; [MS 시기: $F(1,42)=320.353$ $p<.001$, $\eta^2=.884$], 집단 및 상호작용 효과는 유의하지 않았다. 기술 통계를 확인한 결과 모든 집단은 갑작스런 외력의 사라짐에도 불구하고 더 적은 거리 오차와 각도 오차를 나타내었으므로 왼손의 학습 효과가 나타나지 않은 것으로 파악된다.

(3) 오른손 왼손 비교

ctDCS의 극성에 따른 왼손의 전이 정도를 파악하기 위해 집단별 적응 2구간과 탈적응 구간에 대한 오른손 왼손의 RT 비교 분석을 위해 삼원 분산분석을 시행하였다. 그 결과, 집단[F=(2, 84)=3.360, p=.038, η^2=.074]과 시기의 주효과는 나타났으나[F=(1,84)=2403.684, $p<.001$, η^2=.966], 상호작용 효과는 나타나지 않았다. 집단의 주효과에 대한 사후검정결과, 오른손에서 집단 AE와 SE 간의 유의한 차이를 나타냈다. MT는 시기의 주효과가 나타났으며($p<.001$), CE를 제외한 모든 집단의 시기(적응 2구간-탈적응)에서 유의한 변화를 나타냈다.

DE는 집단과 시기 주효과 모두 나타났으나, 전이와 상호작용 효과는 나타나지 않았다. 각각의 주효과에 대한 *Tukey HSD* 사후검정 결과, 오른손에서의 집단 AE와 SE 유의한 차이가 나타났고(Group: p=007, Period: $p<.001$), 왼손에서는 유의하지 않았다. 시기는 모든 집단에서 유의하였다. 또한, HA는 집단의 주효과가 나타났으며<.006, MS는 집단과 시기의 주효과 나타났으나(Group: p=031, Period p<001) 전이와의 상호작용 효과는 나타나지 않아, ctDCS의 극성에 따른 왼손 전이 학습은 지각 운동과제에서 서로 다른 차이를 불러일으키지 않는다.

Ⅴ. 논의

본 연구의 목적은 인지 전략 학습에 기반한 두 조건, 암묵 및 명시적 유도전략 학습(적응)이 운동학습 과정에 미치는 영향들을 살펴보고, 비침습 소뇌 자극의 극성(anode, cathode, sham)에 따른 명시적 학습의 수행과정을 정량적으로 측정하여 운동적응(학습)의 양상을 분석하였다.

연구과제는 외력(force-field)이 주어진 상황에서 목표물을 향해 팔을 뻗어 정확히 목표물에 도달하는 과제로, 참여자는 이 외력의 방해에도 불구하고 정확히 직선으로 움직여야 했다. 본 과제 수행에서 발생한 운동정보들이 운동학습(적응)과 전이에 어떤 영향을 미치는지 살펴보았으며, ctDCS 극성에 따른 명시적 운동학습의 수행 변화를 비교 분석하여, 명시적 학습에서 나타나는 소뇌의 특징적인 역할에 대해 살펴보고자 하였다.

1. 인지 전략에 따른 지각운동 학습(적응)의 차이

본 연구의 참여자는 외력이 주어진 팔 뻗기 과제를 수행하였고, 암묵 및 명시적 지시에 따른 손 뻗기 과제를 통해, 참여자의 움직임 구성요소가 운동학습(적응) 시 어떤 효율적 운동수행의 변화를 가져오는지 직접 관찰할 수 있었다.

참여자에게 제한된 수행 준비 시간을 제공함으로써 인지 전략적 학습의 구성요소를 분리할 수 있었고, 준비 시간이 길수록(1050ms) 학습을 위한 인지적 기여가 반영된다고 보았으며, 짧을수록(300ms) 자동적 처리 과정을 거쳐 학습된다고 보았다. 먼저, 암묵 및 명시적 유도전략 학습에 따른 지각운동 적응의 차이를 살펴보기 위해 ctDCS 처치가 주어지지 않은 두 무극(sham) 집단 간의 운동 수행을 비교 분석하였다. 이를 통해, 서로 다른 인지 과정이 사용되도록 유도된 운동학습(적응)의 제어 구조는 어떤 수행 요인에 의해 학습의 차이를 나타내는지 확인할 수 있었다.

본 실험을 통해 가장 두드러진 차이는 반응시간으로 암묵적 유도전략 학습(SI)이 명시적 유도전략 학습(SE)보다 반응시간이 좀 더 빨랐으며, 시간이 지속하여도 반응시간이 줄어들지 않았다. 다른 의미로 암묵적 유도전략 집단은 시간이 흘러도 안정적인 반응시간을 나타냈다. 반면, SE는 암묵적 유도전략의 학습보다 느린 반응시간을 나타냈으나, 수행을 거듭할수록 반응시간이 줄어드는 유의한 변화를 나타냈다. 이는 암묵적 학습의 특성상 노력이 덜 소비되는 자동적인 처리 과정에 의해 반응시간이 빠르게 나타난 것으로 보인다. Master(1992)에 따르면 암묵적 유도전략의 학습은 과제에 대한 기본적인 수행 지식 없이도 과제를 습득할 수 있어 비 선택적이고, 수동적이며 때론 이것이 안정적인 특성을 가질 수 있다고 보고하였다.

기본적으로 외력이 주어진 지각운동과제는 학습 초기 인지적 처리로 반응시간이 증가하다가 학습이 진행됨에 따라 점점 적응되어 줄어드는 특성을 보인다(Hardwick et al. 2019; Huberdeau et al. 2019; Leow et al. 2020; McDougle and Taylor 2019). 이러한 변화는 적응(학습) 속도와 인과관계가 있으며(Fernandez-Ruiz et al., 2011), 인지적 기여에 따라 수행에 필요한 추가 시간이 요구되고, 반응시간이 점점 빨라질수록 인지적 요구수준이 낮아져 의식적인 주의가 크게 필요하지 않다. 따라서, 과제 외적인 주위 환경이나 다른 운동기술의 측면으로 주위 전환이 가능하고, 운동 수행 시 발생하는 오류를 줄일 수 있어 운동학습의 향상을 가져올 수 있다.

본 연구와 같은 힘의 장이 주어진 과제는 감각 오류를 크게 발생시켜 실제 감각과의 차이를 느끼게 만든다. 그러나, 인간은 이러한 섭동에도 반복적인 연습을 통해 이내 적응할 수 있으며, 다시 원래의 환경으로 돌아가면 이전 새로운 환경에 적응된 것에 대한 후유증으로 인해 새로운 오류가 발생하게 된다. 이 과정에서 참여자가 후유증을 극복해나가는 방식을 살펴, 각 인지 유도전략 학습에 따른 학습(적응)의 정도를 가늠할 수 있다. 이는 본 연구의 탈적응 1구간을 통해 자세히 살펴볼 수 있으며,

SI(암묵적 유도전략 학습)의 유의한 변화와 적응 1구간에 비해 낮은 거리오차(DE)의 결과를 통해, SI 집단이 외부 섭동의 영향이 전혀 미치지 않았음을 짐작할 수 있으며, 명시적 유도전략의 적응(학습)이 암묵적 유도전략의 적응(학습) 보다 학습의 공고화가 더욱 발현된 것으로 유추해 볼 수 있다.

SE와 SI 집단별 시기(적응 1, 2구간)에 따른 지각운동 수행의 결과는 탈적응 2구간을 통해 확인되었다. SI의 RT가 탈적응 시 유의하게 증가하였고, 이는 적응구간을 통해 학습된 섭동에 대한 빠른 대처가 탈적응 시 SE보다 더욱 느려 유의한 차이를 나타낸 것이다. 아마도 빠른 반응에 적응된 SI 집단의 참여자가 새로운 자극이 주어졌을 때 빠르게 전환하지 못한다는 것은 그만큼 빠른 반응에 공고화(consolidation)되었음을 나타내기도 한다. 이외 SE와 SI 집단 수행의 헤딩각도에서 유의한 차이가 나타났다. 헤딩각도는 본 연구의 참여자들이 과제에 부합하는 수행 의도를 나타내는 것이며, SE 집단이 의도적으로 외력에 저항하는 힘을 고려하여 수행하였다. 탈적응 후 SI와 SE 집단의 헤딩각도가 유의한 차이가 난 것으로 보아, SE 집단은 명시적 지시에 따른 의식적 자각이 운동 명령(motor command)에 영향을 미친 것으로 보이며, 참여자는 수행의 정확성을 높이기 위해 적극적으로 의도적인 가설을 세워 수행하고자 한 것으로 보인다.

종합하면, 암묵적 학습은 빠른 반응을 통해 섭동에 적응하며, 운동 수행 요소들의 가변성이 낮지만, 명시적 학습은 수행에 대한 반응이 느리고, 점차 향상되는 모습을 보인다. 또한, 새로운 환경에 적응 시 거리오차가 크게 나타나 이전 학습에 대한 공고화가 더욱 강하게 작용했을 것으로 유추할 수 있다. 그러나, 시간이 지속될수록 두 학습 간의 유의한 차이는 나타나지 않아 지속시간에 따른 암묵적 학습과 명시적 학습의 변화도 살펴볼 필요가 있다.

2. tDCS 자극별 명시적 유도전략 학습에 따른 수행 비교

본 연구의 주된 과제는 외력에 대한 명시적 지식을 전달받아 목표물을 향해 팔을 정확하게 뻗는 도달과제이다. 이러한 실험 과정에서 모든 참여자는 외력이 주어지기 전 ctDCS의 양극, 음극, 무극이 처치되었고, 본 실험의 주된 목표는 ctDCS의 극성에 따른 운동 수행의 양상 및 차이를 살펴보는 것이었다. 이전 연구에 따르면, 이와 같은 과제에서 소뇌 병변 환자가 명시적 지식을 활용한 과제를 수행할 시, 이들은 목표물을 재조준하는 수행 전략을 사용할 수 있으므로 움직임을 수정하는 데 소뇌가 필요하지 않다고 제안되었다. 반면, 노인을 대상으로 한 소뇌의 tDCS의 양극(anode) 처치가 명시적 과정을 변경시켜 수행 오류에 대한 빠른 보상작용을 나타내었다고 보고하였다(Heuer & Hegele, 2008; Bernard & Seidler, 2013, 2014).

이처럼, 감각 운동 적응과제에서 빠른 오류의 감소 속도는 감각 운동 학습(적응)의 명시적 구성요소가 소뇌의 기능적 역할에 포함될 수 있으므로 이에 대해 면밀히 살펴볼 필요가 있었다. 명시적 지식이 전달된 본 연구의 과제를 통해 소뇌의 양극 자극이 학습 초기 오차 각도를 줄이고, 정확도를 높이는 유의한 변화를 확인할 수 있었다<그림59>.

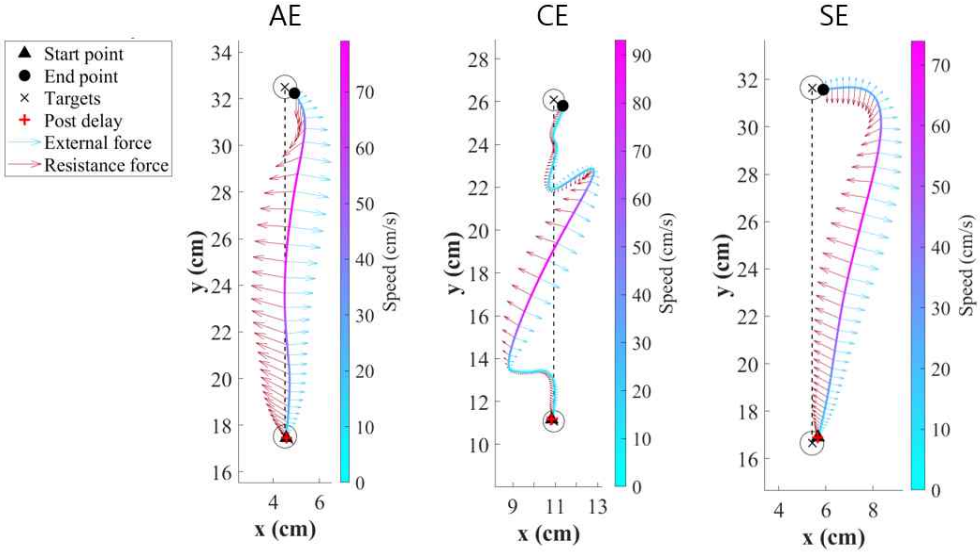


그림 59. 적응 1구간 후기에서 집단별 참여자에게 가해지는 외력(하늘색) 및 저항력(빨간색)

또한, 탈적응 1구간에서 ctDCS의 양극이 처치된 집단은 음극이 처치된 집단보다 학습 초기 큰 오류와 변동성을 보이며 적응하려는 모습을 나타냈다. 이는 앞서 ctDCS의 양극이 처치된 집단이 다른 집단보다 적응1 구간의 학습(적응) 영향이 커 수행에 큰 오류를 나타내고, 예상치 못한 사건에 대한 신속한 대응과 감각 불일치에 보상하려는 소뇌의 기능이 작동하였을 것으로 짐작해 볼 수 있다. 다만 몇몇 연구에서 이러한 결과가 강화 기반의 프로세스 학습으로 소뇌의 영향을 받을 수 있다고 보았으며, 과제에 대한 명시적 지식을 활용한 학습은 선택적 반응과 관련이 있어 강화 기반의 학습 과정에 영향이 미친것으로 보았다(Hanajima et al., 2015; Henriques et al., 2014).

운동과제는 운동시간(MT)과 정확도(DE)(i.e., error rate; Fitts, 1954)의 두 가지 주요 구성요소를 포함하고 있다. Cantarero 등(2015)의 연구에 따르면, ctDCS의 양극 자극으로 소뇌의 가소성을 높이는 것이 운동시간과 정확도 중 어떤 운동 구성요소에 영향을 받는 것인지를 확인한 결과, 양극 자극의 집단이 주로 운동시간의 개선보다 오류율에 더 큰 감소를 나타냈

다. 이는 본 연구결과와 동일한 결과로 소뇌의 양극 자극은 운동 수행의 정확도를 높였다.

3. ctDCS의 자극 여부에 따른 지각운동 수행의 왼손 전이 효과

왼손 과제의 수행은 오른손으로 경험한 외력의 운동감각을 명시적으로 알고 있으며, 그 지식을 활용하여 의도적으로 과제를 수행하도록 지시되었다. 학습 초기 양극을 처치한 집단의 RT가 다른 집단에 비해 느린 결과를 나타냈다. 이는 갑작스러운 외력의 도입으로 인지적 처리가 필요한 운동 수행 초기 양극 자극으로 인해 오히려 느린 RT 결과를 나타낸 것으로 판단된다. 선행연구에 따르면, Primary Motor cortex(M1)에 양극의 tDCS를 처치하여 단순 반응시간 과제를 시행하였더니, 반응시간의 향상이 나타났다고 보고하였다(Molero-Chamizo et al., 2018; Seidel et al., 2019). 다시 말해, 반응시간의 향상을 담당하는 M1이 아닌, ctDCS 양극 처치가 소뇌의 활성화(exhibition)를 유발하고, 동시에 M1의 비활성화를 주도하여, 반응시간이 느린 결과를 나타낸 것으로 보고하였다(Weightman, 2021).

왼손의 적응 2구간에서 AE 집단과 ctDCS의 처치가 이루어지지 않은 SE 집단 간의 유의한 차이가 나타났다. AE 집단이 적응 2구간의 전반에 걸쳐 수행 정확도가 다른 집단에 비해 높았으며, 헤딩각도(HA)는 낮게 나타났다. 그러나, 탈적응 2구간을 살펴본 바로 ctDCS의 극성에 따른 왼손 전이 학습은 명시적 지식이 전달된 손 뻗기 과제에서 유의한 차이를 나타내지 않았다. 따라서, 소뇌가 왼손 전이에는 영향을 미치지 않았음을 유추해 볼 수 있다.

Ⅵ. 결론 및 제언

1. 결론

늘 새로운 환경에 적응해야 하는 인간은 신체감각과 환경과의 상호작용 속에서 움직임을 습득하고 학습한다. 이중 소뇌가 감각 정보와 피드백을 기반으로 움직임을 계획하며 새로운 움직임에 적응하는 데 중요한 역할을 한다. 따라서, 본 연구는 새로운 환경과 같이 변화하는 외부의 섭동을 주고 이에 적응하는 인간의 다양한 운동 수행과정을 관찰하며, 경두개 직류 자극으로 인한 소뇌의 흥분(exhibition) 및 억제(inhibition)가 감각 지각운동 수행에 미치는 영향을 살펴봄으로써, 소뇌의 학습 기전을 확인하고자 하였다. 본 연구는 다음과 같은 결론이 도출되었다.

결론 1. 명시적 유도 학습 전략과 암묵적 유도 학습 전략 간의 감각 지각운동 수행 양상은 다르게 나타났다.

명시적 유도전략 학습은 암묵적 유도전략 학습에 비해 느린 반응시간을 나타냈으며, 운동수행이 거듭될수록 반응시간이 유의하게 줄었다. 또한, 운동학습 초기 높은 운동 가변성을 나타내며, 오류를 수정하는 모습을 보였으며, 수행 초기 학습의 공고화가 암묵적 유도전략보다 더욱 이루어졌으나, 수행이 지속된 상황에서의 학습 효과는 유의한 차이를 나타내지 않았다.

결론 2. 비침습 소뇌 자극의 극성별(양극, 음극, 무극) 감각 운동 적응의 속도 및 적응 정도에 미치는 영향은 다르게 나타났다.

소뇌 병변 환자가 보상 메커니즘(온라인 피드백/ 강화 메커니즘)을 사용하여 적응하는 것에 더욱 결함을 나타낸 것으로 보아 소뇌는 감각 운

동 적응의 명시적 과정과 암묵적 과정 모두에 관여하는 것으로 보인다. 본 연구도 이와 같은 맥락으로, ctDCS의 양극(anode) 자극은 운동 수행 초기 빠른 오류 감소를 나타냈으며, 음극과 무극에 비해 의도적 움직임이 강하게 나타났다. 또한, 시간이 지속 될수록(적응 2구간) AE 집단의 수행 정확도가 다른 집단보다 높은 결과를 나타냈다.

다음과 같은 결론을 바탕으로 소뇌의 tDCS 적용은 감각적응 학습의 기전을 확인하는데 유용한 단서가 될 것으로 생각된다. 본 연구결과는 감각지각 운동(적응) 과정에서 학습을 효율적으로 이행하기 위해 사용된 명시적 유도전략이 ctDCS의 극성에 따라 다양한 수행 양상을 나타냈다. 이를 바탕으로 추후 소뇌 병변 환자들의 운동기능 회복을 위한 실제적 방법에 대한 피드백을 제공해 줄 수 있을 것으로 기대되며 특히, tDCS의 처치는 소뇌 환자의 임상적 방법과 적용 가능성에 대한 선행적 지식을 제공해 줄 것으로 기대된다.

2. 제언

본 연구에서 도출된 결과와 논의를 바탕으로 추후 진행될 연구에서 고려되어야 할 점은 다음과 같다.

제언 1. 본 연구는 명시 및 암묵적 유도전략이 주어진 지각운동과제이다. 두 인지 전략은 실험조건에 따라 나뉘지만, 이러한 전략이 실제 실험 참여자에게 그대로 전달되어 수행되었는지는 알 수 없다. 따라서, 다음과 같은 제한점을 보완하기 위해, 수행 후 참여자의 움직임에 대한 자세한 정보를 보고받는 추가적인 확인 절차가 이루어지면 좀 더 명확한 연구결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

제언 2. 본 연구는 ctDCS의 극성별 명시적 유도전략을 사용한 손 뻗기 과제로 명시적 유도전략에 한해 연구된 것이다. 따라서, 추후 연구에서는 암묵 및 명시적 유도전략의 ctDCS의 극성에 따른 비교 연구가 이루어진다면, 소뇌 영역의 역할을 더욱 명확하게 규명할 수 있을 것이다.

제언 3. 본 연구결과에서 아무런 전이의 효과가 나타나지 않았다. 오른손 수행 시 소요된 시간 동안 ctDCS의 활성화 정도가 감소했을 가능성을 염두하여 ctDCS의 처지 기간을 늘리거나, 전이 직전에 제공하는 방식으로 다양한 tDCS의 처치 방법에 관한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다. 본 연구는 적응 1구간 시작 전 ctDCS 처치가 되었다. tDCS의 처치 권장시간은 하루 20분으로, 뇌의 활성화가 얼마나 지속 가능한가를 살펴본다면, 본 연구에서 나타난 운동 초기의 명백한 변화들이 ctDCS 처치의 지속시간에 의한 것인지 아닌지를 명확히 규명할 수 있을 것이다.

참고문헌

김선진 (2015). **운동학습과 제어**. 대한미디어.

이정모 (2009). **인지과학 패러다임의 새 변화가 학문간 융합에 주는 시사.** 성균관 대학교 출판부.

이순묵, & 차경호. (2000). 실용지능과 묵시지의 혼동: 암묵적 학습을 매개변수로 한 연결. **한국심리학회지: 일반, 19**(1), 29-59.

서혜진, 김선진, 유제광, 정재욱, & 김중석. (2020). 가상현실에서 감각 피드백 종류와 구조에 따른 시지각 운동 적응과제의 학습 효과. **한국스포츠심리학회지, 31**(4), 101-111.

Adams, J. A. (1971). A closed-loop theory of motor learning. *Journal of motor behavior, 3*(2), 111-150.

Alhussein, L., Hosseini, E. A., Nguyen, K. P., Smith, M. A., & Joiner, W. M. (2019). Dissociating effects of error size, training duration, and amount of adaptation on the ability to retain motor memories. *Journal of neurophysiology, 122*(5), 2027-2042.

Allen, R., & Reber, A. S. (1980). Very long term memory for tacit knowledge. *Cognition, 8*(2), 175-185.

Andersson, G., & Armstrong, D. (1987). Complex spikes in Purkinje cells in the lateral vermis (b zone) of the cat cerebellum during locomotion. *The Journal of Physiology, 385*(1), 107– 134.

Anguera, J. A., Bernard, J. A., Jaeggi, S. M., Buschkuehl, M., Benson, B. L., Jennett, S., ... & Seidler, R. D. (2012). The effects of working memory resource depletion and training on sensorimotor adaptation. *Behavioural brain research, 228*(1), 107-115.

Anguera, J. A., Reuter-Lorenz, P. A., Willingham, D. T., & Seidler, R. D. (2010). Contributions of spatial working memory to visuomotor learning. *Journal of cognitive neuroscience, 22*(9), 1917-1930.

Atkinson, R. C., & Shiffrin, R. M. (1971). The control of short-term memory. *Scientific american, 225*(2), 82-91.

Bagce, H. F., Saleh, S., Adamovich, S. V., Krakauer, J. W., & Tunik, E. (2013). Corticospinal excitability is enhanced after visuomotor adaptation and depends on learning rather than performance or error.

Journal of neurophysiology, 109(4), 1097-1106.

Bastian, A. J. (2006). Learning to predict the future: The cerebellum adapts feedforward movement control. *Current Opinion in Neurobiology, 16*(6), 645–649.

Bays, P. M., & Wolpert, D. M. (2006). Actions and consequences in bimanual interaction are represented in different coordinate systems. *Journal of Neuroscience, 26*(26), 7121-7126.

Bays, P. M., & Wolpert, D. M. (2007). Computational principles of sensorimotor control that minimize uncertainty and variability. *The Journal of physiology, 578*(2), 387-396.

Beek, P. J. (2000, October). *Toward a theory of implicit learning in the perceptual-motor domain.* In Scientific Sport Psychology Workshop, Nov, 1997, Amsterdam, Netherlands. Edizioni Luigi Pozzi.

Benussi, A., Dell'Era, V., Cotelli, M. S., Turla, M., Casali, C., Padovani, A., & Borroni, B. (2017). Long term clinical and neurophysiological effects of cerebellar transcranial direct current stimulation in patients with neurodegenerative ataxia. *Brain stimulation, 10*(2), 242-250.

Benussi, A., Koch, G., Cotelli, M., Padovani, A., & Borroni, B. (2015). Cerebellar transcranial direct current stimulation in patients with ataxia: a double-blind, randomized, sham-controlled study. *Movement Disorders, 30*(12), 1701-1705.

Berchtold, N. C., Sabbagh, M. N., Beach, T. G., Kim, R. C., Cribbs, D. H., & Cotman, C. W. (2014). Brain gene expression patterns differentiate mild cognitive impairment from normal aged and Alzheimer's disease. *Neurobiology of aging, 35*(9), 1961-1972.

Bernard, J. A., & Seidler, R. D. (2014). Moving forward: age effects on the cerebellum underlie cognitive and motor declines. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 42*, 193-207.

Bernard, J. A., & Seidler, R. D. (2013). Cerebellar contributions to visuomotor adaptation and motor sequence learning: an ALE meta-analysis. *Frontiers in human neuroscience, 7*, 27.

Bernstein, N. (1966). *The co-ordination and regulation of movements.*

Berry, D. C., Berry, D., & Dienes, Z. (1993). *Implicit learning: Theoretical and empirical issues.* Psychology Press.

Beyer, L., Batsikadze, G., Timmann, D., & Gerwig, M. (2017). Cerebellar tDCS effects on conditioned eyeblinks using different electrode

placements and stimulation protocols. *Frontiers in human neuroscience, 11*, 23.

Bridgeman, B., Kirch, M., & Sperling, A. (1981). Segregation of cognitive and motor aspects of visual function using induced motion. *Perception & Psychophysics, 29*(4), 336-342.

Bright, J. E. H., & Freedman, O. (1998). Differences between implicit and explicit acquisition of a complex motor skill under pressure: An examination of some evidence. *British Journal of Psychology, 89*(2), 249-263.

Butcher, P. A., Ivry, R. B., Kuo, S. H., Rydz, D., Krakauer, J. W., & Taylor, J. A. (2017). The cerebellum does more than sensory prediction error-based learning in sensorimotor adaptation tasks. *Journal of neurophysiology, 118*(3), 1622-1636.

Capolei, M. C., Andersen, N. A., Lund, H. H., Falotico, E., & Tolu, S. (2019). A cerebellar internal models control architecture for online sensorimotor adaptation of a humanoid robot acting in a dynamic environment. *IEEE Robotics and Automation Letters, 5*(1), 80-87.

Cantarero, G., Spampinato, D., Reis, J., Ajagbe, L., Thompson, T., Kulkarni, K., & Celnik, P. (2015). Cerebellar direct current stimulation enhances on-line motor skill acquisition through an effect on accuracy. *Journal of Neuroscience, 35*(7), 3285-3290.

Castiello, U., Paulignan, Y., & Jeannerod, M. (1991). Temporal dissociation of motor responses and subjective awareness: A study in normal subjects. *Brain, 114*(6), 2639-2655.

Celnik, P. (2015). Understanding and modulating motor learning with cerebellar stimulation. *The Cerebellum, 14*(2), 171-174..

Conditt, M. A., Gandolfo, F., & Mussa-Ivaldi, F. A. (1997). The motor system does not learn the dynamics of the arm by rote memorization of past experience. *Journal of Neurophysiology, 78*(1), 554-560.

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.

Diedrichsen, J., Hashambhoy, Y., Rane, T., & Shadmehr, R. (2005). Neural correlates of reach errors. *Journal of Neuroscience, 25*(43), 9919-9931.

Dienes, Z., & Berry, D. (1997). Implicit learning: Below the subjective

threshold. *Psychonomic bulletin & review, 4*(1), 3-23.

Ehsani, F., Bakhtiary, A. H., Jaberzadeh, S., Talimkhani, A., & Hajihasani, A. (2016). Differential effects of primary motor cortex and cerebellar transcranial direct current stimulation on motor learning in healthy individuals: a randomized double-blind sham-controlled study. *Neuroscience research, 112*, 10-19.

Ericsson, K. A., Krampe, R. T., & Tesch-Römer, C. (1993). The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychological Review, 100*, 3, 363-406.

Farrow, D., & Abernethy, B. (2003). Implicit perceptual learning and the significance of chance comparisons: a response to Jackson. *Journal of Sports Sciences, 21*(6), 511-513.

Fernandez-Ruiz, J., Wong, W., Armstrong, I. T., & Flanagan, J. R. (2011). Relation between reaction time and reach errors during visuomotor adaptation. *Behavioural brain research, 219*(1), 8-14.

Ferrucci, R., Bocci, T., Cortese, F., Ruggiero, F., & Priori, A. (2016). Cerebellar transcranial direct current stimulation in neurological disease. *Cerebellum & ataxias, 3*(1), 1-8.

Ferrucci, R., Cortese, F., & Priori, A. (2015). Cerebellar tDCS: how to do it. *The Cerebellum, 14*(1), 27-30.

Flament, D., Ellermann, J. M., Kim, S. G., Uğurbil, K., & Ebner, T. J. (1996). Functional magnetic resonance imaging of cerebellar activation during the learning of a visuomotor dissociation task. *Human Brain Mapping, 4*(3), 210–226.

Fodor, J. A. (1975). *The language of thought New York.*

Franklin, D. W., & Wolpert, D. M. (2011). Computational mechanisms of sensorimotor control. *Neuron, 72*(3), 425-442.

Gibson, J. J. (1950). *The perception of the visual world.*

Gillespie, R. B., Ghasemi, A. H., & Freudenberg, J. (2016). Human motor control and the internal model principle. *IFAC-PapersOnLine, 49*(19), 114-119.

Hanajima, R., Shadmehr, R., Ohminami, S., Tsutsumi, R., Shirota, Y., Shimizu, T., ... & Kitazawa, S. (2015). Modulation of error-sensitivity during a prism adaptation task in people with cerebellar degeneration. *Journal of neurophysiology, 114*(4), 2460-2471.

Hardwick, R. M., Forrence, A. D., Krakauer, J. W., & Haith, A. M. (2019).

Time-dependent competition between goal-directed and habitual response preparation. *Nature Human Behaviour, 3*(12), 1252-1262.

Henriques, D. Y., Filippopulos, F., Straube, A., & Eggert, T. (2014). The cerebellum is not necessary for visually driven recalibration of hand proprioception. *Neuropsychologia, 64*, 195-204.

Heuer, H., & Hegele, M. (2008). Adaptation to visuomotor rotations in younger and older adults. *Psychology and aging, 23*(1), 190.

Honda, T., Nagao, S., Hashimoto, Y., Ishikawa, K., Yokota, T., Mizusawa, H., & Ito, M. (2018). Tandem internal models execute motor learning in the cerebellum. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 115*(28), 7428-7433.

Horn, K. M., Pong, M., & Gibson, A. R. (2004). Discharge of inferior olive cells during reaching errors and perturbations. *Brain Research, 996*(2), 148– 158.

Huberdeau, D. M., Krakauer, J. W., & Haith, A. M. (2019). Practice induces a qualitative change in the memory representation for visuomotor learning. *Journal of neurophysiology, 122*(3), 1050-1059.

Hulst, T., John, L., Küper, M., van der Geest, J. N., Göricke, S. L., Donchin, O., & Timmann, D. (2017). Cerebellar patients do not benefit from cerebellar or M1 transcranial direct current stimulation during force-field reaching adaptation. *Journal of neurophysiology, 118*(2), 732-748.

Imamizu, H., Miyauchi, S., Tamada, T., Sasaki, Y., Takino, R., Pütz, B., ... Kawato, M. (2000). Human cerebellar activity reflecting an acquired internal model of a new tool. *Nature, 403*(6766), 192– 195.

Ito, M. (2005). Bases and implications of learning in the cerebellum—Adaptive control and internal model mechanism. *Progress in Brain Research, 148*, 95–109.

Jackson, R. (2003). Evaluating the evidence for implicit perceptual learning: A re-analysis of Farrow and Abernethy (2002). *Journal of sports sciences, 21*(6), 503-509.

Jalali, R., Miall, R. C., & Galea, J. M. (2017). No consistent effect of cerebellar transcranial direct current stimulation on visuomotor adaptation. *Journal of Neurophysiology, 118*(2), 655-665.

Jayaram, G., Tang, B., Pallegadda, R., Vasudevan, E. V., Celnik, P., & Bastian, A. (2012). Modulating locomotor adaptation with cerebellar

stimulation. *Journal of neurophysiology, 107*(11), 2950-2957.

Johnson, J. F., Belyk, M., Schwartze, M., Pinheiro, A. P., & Kotz, S. A. (2019). The role of the cerebellum in adaptation: ALE meta-analyses on sensory feedback error. *Human brain mapping, 40*(13), 3966-3981.

Kagerer, F. A., Contreras-Vidal, J. L., Bo, J., & Clark, J. E. (2006). Abrupt, but not gradual visuomotor distortion facilitates adaptation in children with developmental coordination disorder. *Human movement science, 25*(4-5), 622-633.

Kami, A., Meyer, G., Jezzard, P., Adams, M. M., Turner, R., & Ungerleider, L. G. (1995). Functional MRI evidence for adult motor cortex plasticity during motor skill learning. *Nature, 377*(6545), 155-158.

Kawato, M. , & Gomi, H. (1992). A computational model of four regions of the cerebellum based on feedback-error learning. *Biological Cybernetics, 68*(2), 95–103.

Kawato, M., Furukawa, K., & Suzuki, R. (1987). A hierarchical neural-network model for control and learning of voluntary movement. *Biological cybernetics, 57*(3), 169-185.

Kawato, M., & Wolpert, D. (1998). Internal models for motor control. *Sensory guidance of movement, 218*, 291-307.

Keisler, A., & Shadmehr, R. (2010). A shared resource between declarative memory and motor memory. *Journal of Neuroscience, 30*(44), 14817-14823.

Kim, N. G., & Turvey, M. T. (1999). Eye movements and a rule for perceiving direction of heading. *Ecological Psychology, 11*(3), 233-248.

Krakauer, J. W., Ghilardi, M. F., & Ghez, C. (1999). Independent learning of internal models for kinematic and dynamic control of reaching. *Nature neuroscience, 2*(11), 1026-1031.

Kumari, N., Taylor, D., Rashid, U., Vandal, A. C., Smith, P. F., & Signal, N. (2020). Cerebellar transcranial direct current stimulation for learning a novel split-belt treadmill task: A randomised controlled trial. *Scientific reports, 10*(1), 1-14.

Kurtzer, I., DiZio, P., & Lackner, J. (2003). Task-dependent motor learning. *Experimental brain research, 153*(1), 128-132.

Lackner, J. R., & Dizio, P. (1994). Rapid adaptation to Coriolis force perturbations of arm trajectory. *Journal of neurophysiology, 72*(1),

299-313.
Lashley, K. S. (1917). The accuracy of movement in the absence of excitation from the moving organ. *American Journal of Physiology-Legacy Content, 43*(2), 169-194.
Lee, J. H., & van Donkelaar, P. (2002). Dorsal and ventral visual stream contributions to perception-action interactions during pointing. *Experimental Brain Research, 143*(4), 440-446.
Lee, K., Oh, Y., Izawa, J., & Schweighofer, N. (2018). Sensory prediction errors, not performance errors, update memories in visuomotor adaptation. *Scientific reports, 8*(1), 1-9.
Leow, L. A., Marinovic, W., Riek, S., & Carroll, T. J. (2017). Cerebellar anodal tDCS increases implicit learning when strategic re-aiming is suppressed in sensorimotor adaptation. *PLoS One, 12*(7), e0179977.
Leow, L. A., Marinovic, W., de Rugy, A., & Carroll, T. J. (2020). Task errors drive memories that improve sensorimotor adaptation. *Journal of neuroscience, 40*(15), 3075-3088.
Libet, B. (1985). Unconscious cerebral initiative and the role of conscious will in voluntary action. *Behavioral and brain sciences, 8*(4), 529-539.
Liebetanz, D., Nitsche, M. A., Tergau, F., & Paulus, W. (2002). Pharmacological approach to the mechanisms of transcranial DC-stimulation-induced after-effects of human motor cortex excitability. *Brain, 125*(10), 2238-2247.
Logan, G. D. (1988). Toward an instance theory of automatization. *Psychological review, 95*(4), 492.
MacMahon, K., & Masters, R. S. (2002). The effects of secondary tasks on implicit motor skill performance. *International Journal of sport psychology*.
Martin, T. A., Keating, J. G., Goodkin, H. P., Bastian, A. J., & Thach, W. T. (1996). Throwing while looking through prisms: I. Focal olivocerebellar lesions impair adaptation. *Brain, 119*(4), 1183-1198.
Masters, R. S. (1992). Knowledge, knerves and know-how: The role of explicit versus implicit knowledge in the breakdown of a complex motor skill under pressure. *British journal of psychology, 83*(3), 343-358.
Maxwell, J. P., Masters, R. S., & Eves, F. F. (2000). From novice to no know-how: A longitudinal study of implicit motor learning. *Journal*

of sports sciences, 18(2), 111-120.

Maxwell, J. P., Masters, R. S. W., Kerr, E., & Weedon, E. (2001). The implicit benefit of learning without errors. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A, 54*(4), 1049-1068.

Mazzoni, P., & Krakauer, J. W. (2006). An implicit plan overrides an explicit strategy during visuomotor adaptation. *Journal of neuroscience, 26*(14), 3642-3645.

McDonald, P., Oliver, S. K., & Newell, K. M. (1995). Perceptual-motor exploration as a function of biomechanical and task constraints. *Acta psychologica, 88*(2), 127-165.

McDougle, S. D., Bond, K. M., & Taylor, J. A. (2015). Explicit and implicit processes constitute the fast and slow processes of sensorimotor learning. *Journal of Neuroscience, 35*(26), 9568-9579.

McDougle, S. D., & Taylor, J. A. (2019). Dissociable cognitive strategies for sensorimotor learning. *Nature communications, 10*(1), 1-13.

Miall, R. C., Imamizu, H., & Miyauchi, S. (2000). Activation of the cerebellum in co-ordinated eye and hand tracking movements: an fMRI study. *Experimental Brain Research, 135*(1), 22-33.

Miall, R. C., & Reckess, G. Z. (2002). The cerebellum and the timing of coordinated eye and hand tracking. *Brain and cognition, 48*(1), 212-226.

Miall, R. C., & Christensen, L. O. D. (2004). The effect of rTMS over the cerebellum in normal human volunteers on peg-board movement performance. *Neuroscience letters, 371*(2-3), 185-189.

Miall R, Christensen L, Cain O, Stanley J. Disruption of stateestimation in the human lateral cerebellum. *PLoS Biol. 2007;5*(11):e316

Miller G.A. (1955) *The Magic Number Seven Plus or Minus Two: Some Limits On Our Capacity For Processing Information* Psychological Review 101(2):343-352.

Milner, D., & Goodale, M. (2006). *The Visual Brain in Action*: Oxford University Press, USA.

Moberget, T., Gullesen, E. H., Andersson, S., Ivry, R. B., & Endestad, T. (2014). Generalized role for the cerebellum in encoding internal models: Evidence from semantic processing. *Journal of Neuroscience, 34*(8), 2871– 2878.

Molero-Chamizo, A., Alameda Bailén, J. R., Garrido Béjar, T., García López,

M., Jaén Rodríguez, I., Gutiérrez Lérida, C., ... & Rivera-Urbina, G. N. (2018). Poststimulation time interval-dependent effects of motor cortex anodal tDCS on reaction-time task performance. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience, 18*(1), 167-175.

Morton, S. M., & Bastian, A. J. (2004). Cerebellar control of balance and locomotion. *The neuroscientist, 10*(3), 247-259.

Newell, K. M. (1991). Motor skill acquisition. *Annual review of psychology, 42*(1), 213-237.

Newell, K. M., & McDonald, P. V. (1992). in american academy of physical education (Ed.), Enhancing human performance in sport: New concepts and developments. *Human Kinetics: Champaign, IL*.

Nowak, D. A., Topka, H., Timmann, D., Boecker, H., & Hermsdörfer, J. (2007). The role of the cerebellum for predictive control of grasping. *The cerebellum, 6*(1), 7-17.

Ohtsuka, K., & Enoki, T. (1998). Transcranial magnetic stimulation over the posterior cerebellum during smooth pursuit eye movements in man. Brain: a journal of neurology, 121(3), 429-435.

Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia, 9*(1), 97-113.

O'reilly, J. X., Beckmann, C. F., Tomassini, V., Ramnani, N., & Johansen-Berg, H. (2010). Distinct and overlapping functional zones in the cerebellum defined by resting state functional connectivity. *Cerebral cortex, 20*(4), 953-965.

Petersen, S. E., Van Mier, H., Fiez, J. A., & Raichle, M. E. (1998). The effects of practice on the functional anatomy of task performance. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 95*(3), 853-860.

Piccinini, G., & Scarantino, A. (2010). Computation vs. information processing: why their difference matters to cognitive science. *Studies in History and Philosophy of Science Part A, 41*(3), 237-246.

Pierella, C., Casadio, M., Mussa-Ivaldi, F. A., & Solla, S. A. (2019). The dynamics of motor learning through the formation of internal models. *PLoS computational biology, 15*(12), e1007118.

Poh, E., Carroll, T. J., & Taylor, J. A. (2016). Effect of coordinate frame compatibility on the transfer of implicit and explicit learning across limbs. *Journal of neurophysiology, 116*(3), 1239-1249.

Popa, L. S., & Ebner, T. J. (2019). Cerebellum, predictions and errors.

Frontiers in cellular neuroscience, 12, 524.

Provins, K. A. (1958). The effect of peripheral nerve block on the appreciation and execution of finger movements. *The Journal of physiology, 143*(1), 55-67.

Rabe, K., Livne, O., Gizewski, E. R., Aurich, V., Beck, A., Timmann, D., & Donchin, O. (2009). Adaptation to visuomotor rotation and force field perturbation is correlated to different brain areas in patients with cerebellar degeneration. *Journal of neurophysiology, 101*(4), 1961-1971.

Reber, A. S. (1992). The cognitive unconscious: An evolutionary perspective. *Consciousness and cognition, 1*(2), 93-133.

Redding, G. M., & Wallace, B. (2000). Prism exposure aftereffects and direct effects for different movement and feedback times. *Journal of Motor Behavior, 32*(1), 83-99.

Redding, G. M., & Wallace, B. (2002). Strategie calibration and spatial alignment: a model from prism adaptation. *Journal of motor behavior, 34*(2), 126-138.

Ripoll, H. U. B. E. R. T., & Benguigui, N. I. C. O. L. A. S. (1999). Emergence of expertise in ball sports during child development. *International Journal of Sport Psychology, 30*(2), 235-245.

Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological review, 82*(4), 225.

Schmidt, R. A., Lee, T. D. (2005). Motor control and learning: A behavioral emphasis. *Human kinetics*.

Schmidt, R. A., Lee, T. D. (2013). Motor control and learning: A behavioral emphasis(6th Ed). *Human kinetics*.

Schween, R., Taube, W., Gollhofer, A., & Leukel, C. (2014). Online and post-trial feedback differentially affect implicit adaptation to a visuomotor rotation. *Experimental brain research, 232*(9), 3007-3013.

Schween, R., McDougle, S. D., Hegele, M., & Taylor, J. A. (2020). Assessing explicit strategies in force field adaptation. *Journal of neurophysiology, 123*(4), 1552-1565.

Schweizer, J., Müller, A., Forkmann, L., Hellner, G., & Kirch, W. (2001). Potential use of a low-molecular-weight heparin to prevent restenosis in patients with extensive wall damage following peripheral angioplasty. *Angiology, 52*(10), 659-669.

Seidel, O., & Ragert, P. (2019). Effects of transcranial direct current stimulation of primary motor cortex on reaction time and tapping performance: A comparison between athletes and non-athletes. *Frontiers in human neuroscience, 13*, 103.

Shadmehr, R., & Mussa-Ivaldi, F. A. (1994). Adaptive representation of dynamics during learning of a motor task. *Journal of neuroscience, 14*(5), 3208-3224.

Shea, C. H., Wulf, G., Whitacre, C. A., & Park, J. H. (2001). Surfing the implicit wave. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology: Section A, 54*(3), 841-862.

Shumway-Cook, A., & Woollacott, M. H. (2007). Motor control: translating research into clinical practice. *Lippincott Williams & Wilkins.*

Skavenski, A. A., & Hansen, R. M. (1978). Role of eye position information in visual space perception. *Eye Movements and the Higher Psychological Functions*, 15-34.

Smith, S. M. (2002). Fast robust automated brain extraction. *Human brain mapping, 17*(3), 143-155.

Sober, S. J., & Sabes, P. N. (2003). Multisensory integration during motor planning. *Journal of Neuroscience, 23*(18), 6982-6992.

Soon, C. S., Brass, M., Heinze, H. J., & Haynes, J. D. (2008). Unconscious determinants of free decisions in the human brain. *Nature neuroscience, 11*(5), 543-545.

Squire, L. R. (1987). Memory and brain. *Oxford University Press*.

Stadler, M. A. (1997). Distinguishing implicit and explicit learning. *Psychonomic Bulletin & Review, 4*(1), 56-62.

Stanley, J., & Krakauer, J. W. (2013). Motor skill depends on knowledge of facts. *Frontiers in human neuroscience, 7*, 503.

Steiner, K. M., Enders, A., Thier, W., Batsikadze, G., Ludolph, N., Ilg, W., & Timmann, D. (2016). Cerebellar tDCS does not improve learning in a complex whole body dynamic balance task in young healthy subjects. *PloS one, 11*(9), e0163598.

Taylor, J. A., & Ivry, R. B. (2011). Flexible cognitive strategies during motor learning. *PLoS computational biology, 7*(3), e1001096.

Taylor, J. A., & Ivry, R. B. (2012). The role of strategies in motor learning. Annals of the New York Academy of Sciences, 1251(1), 1-12.

Taylor, J. A., Klemfuss, N. M., & Ivry, R. B. (2010). An explicit strategy

prevails when the cerebellum fails to compute movement errors. *The Cerebellum, 9*(4), 580-586.

Taylor, J. A., Wojaczynski, G. J., & Ivry, R. B. (2011). Trial-by-trial analysis of intermanual transfer during visuomotor adaptation. *Journal of Neurophysiology, 106*(6), 3157-3172.

Thompson, R. F., & Kim, J. J. (1996). Memory systems in the brain and localization of a memory. *Proceedings of the national academy of sciences, 93*(24), 13438-13444.

Thürer, B., Stockinger, C., Focke, A., Putze, F., Schultz, T., & Stein, T. (2016). Increased gamma band power during movement planning coincides with motor memory retrieval. *Neuroimage, 125*, 172-181.

Tseng, Y. W., Diedrichsen, J., Krakauer, J. W., Shadmehr, R., & Bastian, A. J. (2007). Sensory prediction errors drive cerebellum-dependent adaptation of reaching. *Journal of neurophysiology, 98*(1), 54-62.

Van der Vliet, R., Ribbers, G. M., Vandermeeren, Y., Frens, M. A., & Selles, R. W. (2017). BDNF Val66Met but not transcranial direct current stimulation affects motor learning after stroke. *Brain Stimulation, 10*(5), 882-892.

Weightman, M., Brittain, J. S., Miall, R. C., & Jenkinson, N. (2021). Direct and indirect effects of cathodal cerebellar TDCS on visuomotor adaptation of hand and arm movements. *Scientific Reports, 11*(1), 1-10.

Wessel, M. J., Zimerman, M., Timmermann, J. E., Heise, K. F., Gerloff, C., & Hummel, F. C. (2016). Enhancing consolidation of a new temporal motor skill by cerebellar noninvasive stimulation. *Cerebral Cortex, 26*(4), 1660-1667.

Werner, S., Schorn, C. F., Bock, O., Theysohn, N., & Timmann, D. (2014). Neural correlates of adaptation to gradual and to sudden visuomotor distortions in humans. *Experimental brain research, 232*(4), 1145-1156.

Willingham, D. B. (1998). A neuropsychological theory of motor skill learning. *Psychological review, 105*(3), 558.

Wilson, D. M. (1961). The central nervous control of flight in a locust. *Journal of Experimental Biology, 38*(2), 471-490.

Wilterson, S. A., & Taylor, J. A. (2019). Implicit adaptation processes appear unable to account for learning in sensorimotor adaptation tasks. *bioRxiv, 711598*.

Wilterson, S. A., & Taylor, J. A. (2021). Implicit visuomotor adaptation remains limited after several days of training. *Eneuro, 8*(4).

Wolpert, D. M., & Kawato, M. (1998). Multiple paired forward and inverse models for motor control. *Neural networks, 11*(7-8), 1317-1329.

Wolpert, D. M. , Miall, R. C. , & Kawato, M. (1998). Internal models in the cerebellum. *Trends in Cognitive Sciences, 2*(9), 338−347.

Wulf, G., Lauterbach, B., & Toole, T. (1999). The learning advantages of an external focus of attention in golf. *Research quarterly for exercise and sport, 70*(2), 120-126.

Abstract

Comparison of Motor Performance by Cerebellar Non-Invasive Stimulation in Reaching Adaptation Tasks Using Explicit-Induction Strategies

Hyejin Seo
Department of Physical Education
The Graduate School
Seoul National University

Humans can learn new motor activities through a variety of learning methods. Sensorimotor learning based on implicit learning and explicit learning are two types of learning that are frequently investigated.
In this study, both of the cerebellum was used in this investigation to monitor sensorimotor performance. The influence of the cerebellum's level of activation on sensorimotor performance was then studied in order to better understand the functional role of the cerebellum. Thirty-two healthy adult males(each group consisted of 8 men; average age = 26.14.9; range, 19-37

years) who were free of orthopedic and neurological conditions participated in the study.

The experimental task involves stretching the arm in a straight line while a force field is applied from one beginning point to the target point. The subject must overcome the force field to complete the task. In this procedure, the behavioral patterns of polarized ctDCS in perceptual-motor performance given an explicit induction strategy(group 3) were compared and analyzed. The changes in exercise performance of the implicit guidance strategy group(Group 1: sham) and the explicit guidance strategy group(Group 3: anode, cathode, sham) were examined.

As a result, the explicit induction technique and the implicit induction strategy had distinct rates of adaptation and levels of adaption. The movement time(MT) decreased in accordance with the performance of the movement, while the reaction time(RT) in the group using the explicit motor learning increased when the performance was repeated.

Contrarily, the implicit motor learning demonstrated consistent performance change and quick response time(RT). As a consequence of looking at how each learning aspect was combined in the washout portion, it was discovered that in the explicit group, the performance intention that did not manifest itself during the performance remained strong long after the external force had vanished.

In addition, the performance accuracy was significantly higher, indicating that the residual effect of learning remained more than that of the implicit motor learning. The intentional movement of the ctDCS anode was found to be stronger than that of the cathode or the sham (false stimulus), and movement variability to correct errors in the early stages of learning was found to be large. This was discovered by examining the perceptual movement performance of the explicit motor learning according to the polarity of ctDCS.

The group that had ctDCS anode treatment in the washout 1 portion, which looked at the impact of learning after the initial learning,

demonstrated a more purposeful movement in response to an external stimulus, while the washout 2 outcome did not significantly differ between the groups. When the effect of learning transfer was finally examined, there was a significant difference according to time but no difference across groups, indicating that there was no effect of transfer.

As a result, it appears that the cerebellum's anodal stimulation had a more rapid learning effect and that the perceptual-motor performance was more strongly influenced by the intention to participate in the action.

Keywords: cerebellum, cerebellar transcranial direct current stimulation(ctDCS), implicit motor learning, explicit motor learning, non-invasive brain stimulation, adaptation task

Student Number: 2016-30439