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

체육학 석사 학위논문

주기적 힘 생성 시 성인 발달성 협응 장애인의 다중 손가락 협응과 전두엽 활성도의 변화

Changes of multi-finger coordination and prefrontal oxygenation in association with prolonged cyclic force production task in adults with developmental coordination disorder

2023년 8월

서울대학교 대학원

체육교육과 인간운동과학전공

김 지 호

주기적 힘 생성 시 성인 발달성 협응 장애인의 다중 손가락 협응과 전두엽 활성도의 변화

지도 교수 박 재 범

이 논문을 체육학 석사 학위논문으로 제출함
2023년 6월

서울대학교 대학원
체육교육과 인간운동과학전공
김 지 호

김지호의 체육학 석사 학위논문을 인준함
2023년 6월

위 원 장 _____ 김 연 수 _____ (인)

부위원장 _____ 안 주 은 _____ (인)

위 원 _____ 박 재 범 _____ (인)

국문초록

주기적 힘 생성 시 성인 발달성 협응 장애의 다중 손가락 협응과 전두엽 활성도의 변화

김 지 호
서울대학교 대학원
체 육 교 육 과

본 연구의 목적은 주기적으로 손가락 힘을 생성하는 과제에서 발달성 협응 장애(DCD)를 가진 성인의 다중 손가락 협응과 전두엽피질 산소포화도의 관계를 탐구하는 것이다. 발달성협응장애(Developmental Coordination Disorder: DCD)는 자신의 시간적 연령에 대한 기대 이하의 운동협응능력을 가지고 있는 신경발달 장애 중 하나이다. 이들은 일상생활에서 사용되는 운동기술을 행하는데 어려움을 겪으며, 특히 소근운동기술의 수행 수준이 현저하게 낮다는 연구결과들이 지속적으로 보고되고 있다. 특히, 눈-손 협응 과제에서 통제집단에 비해 과도한 전두엽 피질 영역의 활동성을 가진다는 연구 결과는 DCD의 서툰 움직임 특성과 집중력 간의 밀접한 관련성을 암시한다. 따라서 본 연구는 장시간 주기적 힘 생성 과제의 종속 변인들로 집중력의 영향을 정량화 할 수 있는지 확인하고, 성인 DCD의 낮은 운동 수행 능력이 해당 분석 변인들에서 어떻게 관찰되는지 확인하기 위해 진행되었다.

이를 위해 정형학적, 신경학적 문제가 없는 피험자들을 ADC와 MABC-2를 이용하여 DCD집단(15명)과 통제집단(15명)으로 나누어 연구를 진행하였다. 모든 피험자들은 전두엽 피질의 산소 소비량을 측정하기 위해 기능성 근적외선 분광기(fNIRS)를 착용한 상태에서 네 손가락을 이용하여 3분 동안 컴퓨터로 송출되는 0.5Hz 주기의 사인파 템플릿에 맞춰 손가락 힘을 생성하도록 지시받았다. 탬플릿의 진폭은 최대 자발적 수축(MVC) 힘의 5%

에서 10%로 설정하여 근육 피로를 유발하지 않을 만큼 충분히 작게 설정하였다. 세 번의 실험을 수행하여 한 명의 피험자로부터 총 9분 동안의 데이터를 수집했다. 최대 수축력 과제 결과, DCD의 MVC 힘은 CS보다 현저히 낮았다. 주기적 힘 생성 데이터를 각 구간별로 계산하기 위해 180초의 시계열 데이터를 5단계로 나누고 각 단계마다 모든 변수를 계산했다. 퍼포먼스 변인(MAE, CV)의 결과 힘을 증가시키는 구간에서의 에러가 DCD그룹이 CS에 비해 통계적으로 더 크게 나타났다. 변동계수는 두 그룹간 유의한 주효과를 보였으며, 구간에서의 유의한 주효과가 나타났다. 협응 변인(synergy index)은 두 그룹 간 통계적 차이는 없었으나, 구간에 대한 주효과가 나타났다. 전두엽 피질 활성도의 경우 통제그룹은 통계적 특징이 없었으나, DCD의 경우 초기와 말기에 더 많은 산소를 소비하는 quadratic형태의 U자형 패턴을 보였다.

결론적으로 두 그룹 모두 시간이 지남에 따라 퍼포먼스와 협응 변인의 저하를 보였으며, 특히 DCD의 경우 퍼포먼스 변인에서 통제집단에 비해 더 낮은 수준의 수행능력을 보였다. 이는 DCD가 반복적으로 일정하게 힘을 생성하는 수행력 부분에서 CS에 비해 수행능력이 떨어진다고 볼 수 있다. 또한 시간이 지남에 따라 발생되는 협응지수의 저하는 떨어지는 집중력의 영향을 보여주는 것으로 사료되며, 이러한 현상은 두 집단 모두에서 공통적으로 확인할 수 있었다. 다만, 해당 연구결과 협응 지수에서 그룹 간의 통계적으로 차이를 발견하지 못하였다. 하지만, 전두엽 산소포화도 결과와 함께 놓고 보면, 비슷한 협응 능력에 비해 DCD그룹이 더 높은 산소소비량을 가진 것을 확인할 수 있었다. 이는 같은 협응 능력을 구사하는데 DCD가 더 많은 산소를 필요로 한다는 것을 의미한다.

하지만, 이번 연구 결과는 '주의력'을 요하는 장시간의 힘 생산 과제를 수행하는 동안 협응 지수와 전두엽 뇌 활동의 인과관계를 입증하는 데는 실패했다. 그러나 장시간 지속되는 과제에서는 시간이 지남에 따라 감소하는 종속 변인들은 부분적으로 부주의한 상태 때문인 것으로 추정된다. 따라서 향

후 연구에서는 부주의한 상태로 인해 협응력이 떨어지는 행동을 유도하는 과제를 통해 집중력의 요인에 대해 확인해야 할 것이다.

주요어: 발달성협응장애, 주기적 힘 생성 과제, 다중 손가락 협응, uncontrolled manifold 분석, 전두엽피질 산소포화도
학 번 : 2021-28316

목 차

I. 서론 1

1. 연구의 필요성 1
2. 연구의 목적 3
3. 연구 가설 4

II. 이론적 배경 5

1. 운동 요소의 과잉 5
2. 비제어 다양체 공간 가설 6
3. 전두엽피질과 f_NIRS 7

III. 연구방법 9

1. 실험 참여자 9
2. 실험 장비 10
3. 실험 과제 및 절차 12
4. 분석 변인 14
5. 통계 분석 19

IV. 연구결과 20

1. 최대 힘 생성 과제 결과 20
2. 주기적 힘 생성 과제 결과 22

V. 논의 36

1. 성인 발달성협응장애와 전두엽 피질 산소포화도 36
2. 성인 발달성협응장애와 운동수행 37
3. 집중력과 운동 협응 과제 38

VI. 결론 및 제언 39

참고문헌 41

Abstract 47

<그림 목차>

그림 1. 연구목적 도식화 3
그림 2. fNIRs optical window (source: Felix et al., 2014) 7
그림 3. 신경-혈관 커플링 매커니즘 8
그림 4. ADC 설문지 9
그림 5. MABC-2 평가도구 9
그림 6. 단축 힘 센서 10
그림 7. 단축센서 고정용 알루미늄 패널 10
그림 8. OBELAB fNIRS 장비 11
그림 9. source-detector 구성도 11
그림 10. 실험환경 12
그림 11. 과제 템플릿 13
그림 12. 상대 위상 예시 16
그림 13. 최대 수축력 비교 20
그림 14. 최대 수축력 전·후 비교 21
그림 15. HbO (all channel) 22
그림 16. HbO (오른쪽 외측) 23
그림 17. HbO (오른쪽 내측) 23
그림 18. HbO (왼쪽 외측) 24
그림 19. HbO (왼쪽 내측) 24
그림 20. 그룹간 산소소비량 비교 컬러맵 25
그림 21. 통제집단 산소소비패턴 26
그림 22. DCD집단 산소소비패턴 26
그림 23. 그룹별 기능적 연결성 비교 27
그림 24. 절대평균오차(up) 결과 28
그림 25. 절대평균오차(dw) 결과 29

그림 26. 상대위상(up) 결과 30
그림 27. 상대위상(dw) 결과 30
그림 28. 정확성 변동계수(peak) 결과 31
그림 29. 정확성 변동계수(trough) 결과 31
그림 30. 정밀성 변동계수(peak) 결과 32
그림 31. 정밀성 변동계수(trough) 결과 33
그림 32. ΔVz (up) 결과 34
그림 33. ΔVz (dw) 결과 35
그림 34. VUCM (up) 결과 36
그림 35. VUCM (dw) 결과 36
그림 36. VORT (up) 결과 37
그림 37. VORT (dw) 결과 38
그림 38. 추후 연구 목적 43

I. 서론

1. 연구의 필요성

발달성협응장애(Developmental Coordination Disorder, DCD)는 알려진 신경학적 또는 의학적 상태에 기인하지 않는 운동 능력의 저하로 정의되며, 개인의 학업 성취도, 정신 사회적 기능, 일상 생활의 활동을 상당히 방해한다 (American Psychiatric Association, 2013; Karras, Morin, Gill, Izadi Najafabadi, & Zwicker, 2019; Zwicker, Harris, & Klassen, 2013). 발달성협응장애는 질병 및 관련 건강 문제의 국제분류(ICD-10, WHO, 1992)와 미국정신의학협회(American Psychiatric Association)의 정신장애 진단 및 통계 매뉴얼(DSM-5) 최신판에서 정의하는 신경발달 장애 중 하나이며, 기술된 바에 따르면, 자신의 시간적 연령에 대한 기대 이하의 운동협응능력을 가지고 있고, 영유아 및 아동기 시기 성장과 함께 기대되는 운동 기술들(e.g., 배밀이, 서기, 걷기 등)의 습득과 수행이 지연되거나 부정확하고 서투른 동작으로 나타난다(Missiuna et al., 2006; Polatajko and Cantin, 2005).

발병은 영유아기에서 아동기 초기로 알려져 있기 때문에 시간이 지남에 따라 장기적으로는 호전을 보일 수 있다. 하지만 50~70%에서 운동 협응 문제가 청소년기까지 지속된다 보고되었으며(Blank et al., 2019; Losse et al., 1991; Smits-Engelsman et al., 2013; Tal-Saban, Ornoy, & Parush, 2014), 성인기까지 지속되어 종종 대학 및 직장 환경에서 어려움을 겪는다 보고되었으며(Tal Saban & Kirby, 2018), 성인의 경우 글씨쓰기, 스마트폰과 같은 기계 다루기, 운전, 여가활동 등과 같이 일상생활과 밀접하게 연관된 운동기술을 수행하는 데에 어려움을 겪는다 보고되었다(de Oliveira & Wann, 2011; Kirby et al., 2011; Losse et al., 1991; Missiuna et al., 2008).

하지만, 아직까지 발달성협응장애의 운동기능적 결함의 기초가 되는 신경생리학적 기질은 잘 알려져 있지 않다. 때문에, 많은 연구자들이 발달성협응장애를 대상으로 연구를 진행하고 있다. 그중 운동제어 분야에서 많이 사용되는 눈-손 협응 과제(eye-hand coordination task), 즉 시각 정보를 이용하여 움직임을 형성하는 과제를 진행했을 때, 주의집중력(attention)의 저하가 관찰된다는 연구결과가 보고되었다(Miri tal saban et al., 2014; piek et al., 2004; tom et al., 2021). 여기서 주의 집중력이란, 무엇에 집중할 지, 무엇을 무시할 지를 결정하는 개인의 능력을 말한다(astle

et al., 2009). 연구들에서 주의집중력은 주로 눈의 움직임을 매개로 설명된다. 눈의 움직임을 물체에 고정시키는 과정은 시각운동의 일환으로, 공간 내에서 안구의 움직임이 없을 때 발현되는 인지기능을 집중력으로 정의하고 있다(Treisman & Gelade, 1980). 또한 눈의 단속운동(saccade eye movement)을 이용한 시선도약은 집중력을 나타내는 지표로써 많은 연구에서 사용되고 있으며(Arthur et al., 2021; Emma et al., 2016; Jeffrey D, 2002; Min zhao et al., 2012), 집중력의 영향을 확인하기 위해 단순 반복적인 과제를 장시간 진행시켜 의도적으로 부주의한 환경을 조성하는 유형의 실험을 진행하기도 하였다(Guo et al., 2016).

집중력은 인지기능(cognitive function)을 담당하는 뇌 영역으로 알려진 전두엽 피질(prefrontal cortex)과 밀접한 관련성을 가진다. 최근의 연구들은 전두엽피질의 병변은 실행 기능(executive function)의 손상, 특히 '주의력 장애'로 특정 지어질 수 있다는 연구 결과들은 전두엽 피질과 집중력의 관계성을 추정할 수 있게 한다(Duncan 1986; Knight, 1984; Shallice and Burgess, 1991; Passing ham, 1993; beeman et al., 1994). 이에 더해, 많은 수의 발달성협응장애 대상의 신경영상 연구는 새로운 운동 과제와 인지 과제의 도입 시 소뇌와 전두엽 피질의 공동 활성화를 보여주었으며, 두 영역 간의 연관성을 시사하고 운동 협응과 집행 기능(i.e., 집중력)사이의 연관성을 가정하도록 이끌고 있다 (Diamond, 2000; Dickinson, A. and B. Balleine, 1994; Rigoli et al., 2012).

하지만, DCD를 가진 아이들의 운동 성능이 광범위하게 연구가 된 반면, 성인을 대상으로 한 연구는 미비한 실정이며, 운동협응과제(다중 손가락 힘 생성 과제)와 전두엽 활성도를 관찰하여 집중력의 영향을 확인한 연구는 이루어지지 않았다.

따라서, 본 연구는 주기적 힘 생성 과제를 수행하는 동안 전두엽 활성도와 협응지수 그리고 힘의 변동계수와 같은 측정 변인들을 통해 주의집중력의 영향을 정량화될 수 있는지 확인하고자 하며, 성인 발달성협응장애과 일반 성인간의 간 비교를 통하여 성인 DCD그룹의 움직임 특성을 정량적으로 확인하고자 한다.

2. 연구의 목적

본 연구의 목적은 2가지이다. 1) 다중 손가락 힘 생성 과제와 전두엽 활성도 측정 장비를 통해 확인할 수 있는 측정 변인들로 주의집중력의 영향을 정량화 하고, 2) 일반 성인 그룹(대조군)과의 비교를 통해 성인 DCD그룹의 움직임 차이를 정량적으로 확인하는 것이다. 아래의 그림은 본 연구의 목적을 도식화한 것이다(그림 1).

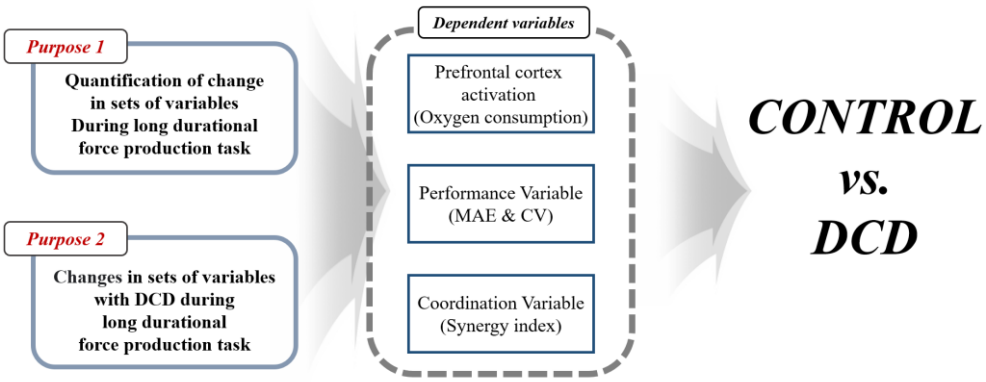


그림 1. 연구목적 도식화

따라서, 본 연구의 측정 변인들을 통해 다소 정성적으로 여겨졌던 집중력이라는 개념을 정량적으로, 또 인간이라는 시스템의 어느 계층에서 그 영향이 두드러지는지 확인할 수 있을 것이며, 성인 발달성협응장애의 대표적인 특징인 낮은 협응 능력과 운동능력이 시스템의 계층 중 어느 부분과 밀접한 연관성을 가지는지 확인할 수 있을 것이며, 또한 일반 성인 그룹과의 비교를 통해, 성인 발달성협응장애가 집중력이란 요인에 어떻게 반응하는지 살펴볼 수 있을 것이며, 어느 영역에 문제로써 발생하는 지를 확인할 수 있는 자료로써 가치가 있을 것이다.

3. 연구 가설

본 연구의 가설은 다음과 같다.

1) 운동수행 지수 (평균절대오차, 변동계수)

1-1) 다중 손가락 힘 생성과제 수행 시 평균절대오차와 변동계수는 처음 구간에서 마지막 구간으로 갈수록 감소할 것이다.

1-2) 감소의 크기는 DCD집단이 통제집단에 비해 클 것이다.

2) 운동협응 지수 (시너지 지수)

2-1) 다중 손가락 힘 생성과제 수행 시 시너지 지수는 처음 구간에서 마지막 구간으로 갈수록 감소할 것이다.

2-2) 감소의 크기는 DCD집단이 통제집단에 비해 클 것이다.

3) 전두엽피질 산소포화도

3-1) 다중 손가락 힘 생성과제 수행 시 전두엽피질 산소포화도는 처음 구간에서 마지막 구간으로 갈수록 감소할 것이다.

3-2) DCD집단과 통제집단의 산소소비패턴은 다르게 나타날 것이다.

II. 이론적 배경

1. 운동 요소의 과잉

인간의 운동 시스템의 구조를 살펴보면, 신경, 근육 섬유를 포함한 많은 세포가 운동 제어에 관여함을 알 수 있다. 이러한 세포 중 하나의 변화는 다른 근육 수축으로 이어질 수 있고, 이는 다른 형태의 근육의 힘 생성, 관절 각도 또는 사지의 움직임을 발생시킬 수 있다. 논리적으로 생각해보면, 매 순간 생겨나는 모든 자발적인 움직임에 대해 모든 신경, 근육, 운동 및 운동학적 요소를 하나씩 제어하는 것은 불가능하다. 또한 필요한 인간 작업을 수행하기 위해 이러한 요소를 조정하는 것엔 무한개의 경우의 수가 존재한다. Nikolai Bernstein은 이 과잉 자유도문제(DOF)를 실현하고 이 문제를 운동 제어의 핵심 문제로 보았다(Bernstein, 1967). 즉 과잉 자유도문제(DOF)란, 특정 신체 부위의 자유도(요소 변인)가 수행하는 과제(수행 변인)의 수보다 많다는 것을 의미한다.

최근 선행 연구들은 이러한 큰 자유도가 중추 신경계(central nerve system)에서 제어해야 하는 주요한 문제로 바라보고 있고(shim et. al., 2011), 그 수많은 요소들이, 문제가 아니라 변화하는 환경에서 행동을 수행하기 위한 성능의 속성(i.e. 성능 변수) 간의 조합을 가능케 하는 원천으로 생각할 수 있으며(Latash, 2000), 과잉 시스템은 수행 변인들을 안정화시키기 위해 과잉된 자유도들이 서로 상호작용할 수 있는 시스템으로 보고 있다(Park et al, 2013). 이는 과잉된 요소들의 수를 줄여 최적화된 해를 찾는 관점과 다르게, CNS가 과제에 적합한 해의 집합을 이용하고, 큰 자유도로 인해 발생하는 가변성이 오류를 발생시켜 수행 능력을 저하시킨다는 기존의 시선(Harris, C. M., & Wolpert, D. M., 1998)에서 오히려 움직임을 성공적으로 수행하기 위한 해결 방법으로 바라볼 수 있다는 점을 시사한다(Latash, 2000).

2. 비제어 다양체 공간 가설

운동 체계 내에서 생기는 운동요소 과잉에 의해 발생하는 기본 요소들의 가변성(variability)을 바라보는 관점은 다양하다(shim et al., 2011). 비제어 다양체 분석(uncotrolled manifold hypothesis)을 기반으로 과잉 요소들의 가변성(공동작용)을 정량화하는 이 분석법은 운동 협응과 관련된 연구에서 주요하게 사용되고 있다(Scholz & Schoner, 1999;. Latash et al., 2002). 신체를 구성하는 기본요소들이 움직임을 효율적으로 형성하기 위해 조직적으로 활동하는 작용을 협응이라 한다. 협응은 신체의 기본요소들이 특정 과제를 수행하기 위해 조합되는 구성요소들의 작용이 과제의 결과에 긍정적인 혹은 부정적인 영향을 줄 수 있으며, 긍정적인 형태의 작용을 '협력 작용'이라 하고 움직임의 공동작용(synergies)이라는 용어로 설명할 수 있다(shin, 2019). Bernstein에 의해 처음으로 소개되었던 synergy라는 개념은, 과제 수행 변인(performance variable)을 안정화시키기 위해, 요소 변인(elemental variable)들을 공동변환(co-varied)하는 명령 방식으로 이해할 수 있다(Park et al, 2013). 이러한 가설은 Berstein이 말한 자유도문제(DOF)를 '운동요소의 과잉(motor redundancy)'의 측면이 아닌 '운동요소 풍요(motor abundance)'의 시각에서 생각할 수 있게 하며, 과잉된 자유도의 이점을 이용하여 과제 수행 변인을 조절한다는 원리를 근간으로 둔다(Latash, 2003).

Synergy 지수는 수행 변인에 영향을 끼치지 않는 부분 공간에서의 상대 분산(Vucm)과 수행 변인의 오차의 부분 공간에서 상대 분산(Vort)을 통해 계산된다. Synergy 지수는 일반적으로 두 분산의 차이에 의해($V_{ucm} - V_{ort}$) 결정된다.

Synergy 지수가 파킨슨 병, 다발성 경화증 및 소뇌 위축증 환자를 포함한 여러 신경학적 환자(특히, 피질 하 영역에서의 손상) 그룹의 운동장애를 나타낸다는 많은 연구 결과들이 보고되고 있다(Park et al. 2012, 2013; Jo et al. 2015, 2017; Ambike et al. 2021). 특히, 뇌졸중 생존자에 대한 연구는 두드러진 성능 변수의 안정성 손상(Gera et al. 2016a, b)과 다중 관절 뻗기 동작 및 다중 손가락 힘 생성 중 변하지 않은 안정성에 대한 보고로 이어졌다(Reisman and Scholz 2003; Jo et al. 2016; Tomita et al. 2020 참조). 이와 같은 피질 하 영역 손상 환자를 대상으로 한 연구결과들은 피질 하 루프(subcortical loop)와 시너지 간의 관계를 암시한다.

3. 전두엽피질(prefrontal cortex)과 f_NIRS

기능적 근적외선 분광법(f_NIRS: functional near-infrared spectroscopy)과 같은 기술의 발전으로 과학자들은 뇌 영역의 신경 활성화 측정을 통해 신경생리학적 시각에서 인간의 운동 제어를 조사한데 관심을 기울이고 있다. 특히, 전두엽피질(Prefrontal Cortex)은 운동제어에 있어 중요한 역할을 하는 것으로 알려져있다. 구조적으로 전두엽피질은 기저핵, 전운동피질, 보조 운동 영역 등 운동 제어와 관련된 넓은 뇌 영역과 상호 연결되어 있다(Fuster, 2015; Miller and Cummings, 2017). 또한 기능적으로 전두엽피질은 감각 입력과 기억으로부터 정보를 수신하고 처리하여 알맞은 행동을 선택하거나 계획하는 등의 인지 제어를 형성한다(Miller and Cohen, 2001; Markowitz, Curtis et al. 2015).

기능적 근적외선 분광법(NIRS: Near Infrared Spectroscopy)은 근적외광(파장: 650~1000㎚)을 시료(생체조직)에 조사하여 생체를 투과하거나 생체 내에서 반사한 빛을 검출하여 비침습적으로 뇌, 근육 및 기타 조직 내의 헤모글로빈(hemoglobin)의 농도와 산소결합(oxygenation)을 검출할 수 있는 영상기술이다. 다시 말해서 NIRS는 측정대상에 근적외광을 조사하여 그 흡광도에 의해 혈류량을 산출하는 수법이다(Felix et al., 2014).

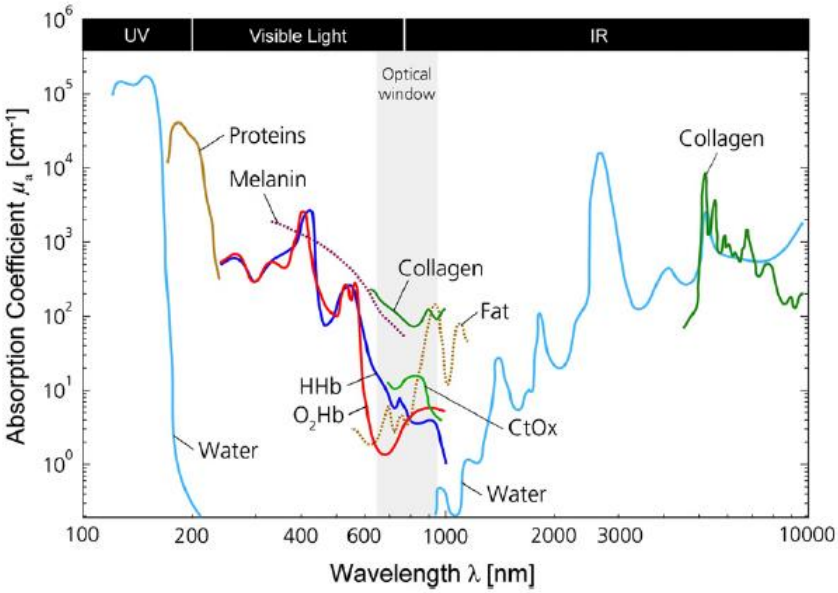


그림 2. fNIRs optical window (source: Felix et al., 2014)

비침습적인 뇌기능 계측방법으로 최근에 주목을 받고 있는 기능적 근적외선 분광법(f_NIRS: functional Near-Infrared Spectroscopy)은 근적외광을 이용해서 뇌의 혈류변화를 비침습적으로 계측하는 방법이며, 계측원리는 근적외광을 이용한 뇌 혈류의 헤모글로빈 산소화 정도의 측정에 바탕을 두고 있다. 인간의 뇌에 근적외광을 조사하여 조직을 투과한 fNIRS 신호를 검출하여 처리하면 산화 헤모글로빈 농도(OxyHb)와 환원 헤모글로빈 농도(DeOxyHb)를 측정할 수 있다. 뇌의 활성화 영역은 혈액 속의 Oxy Hb에 의해 수송된 산소를 소비하고, Oxy Hb는 Deoxy Hb로 변한다. 기능적 근적외선 분광법으로 측정한 이들의 농도는 뇌활동의 척도로서 사용될 수 있다. 이는 신경과 혈관 간의 커플링 (Luke, Brian & Gu, 2020)의 원리를 기반으로 하며, 국소 뇌 혈류의 관련 변화에 신경 활동을 연결하는 메커니즘을 의미한다.

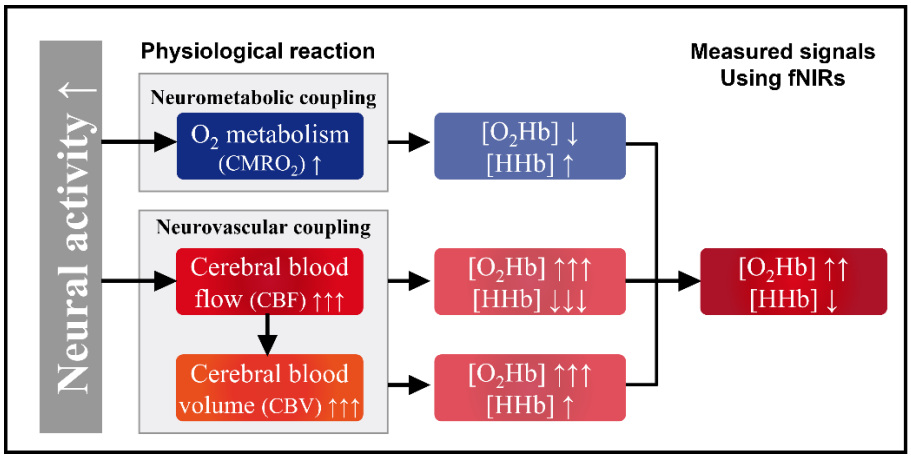


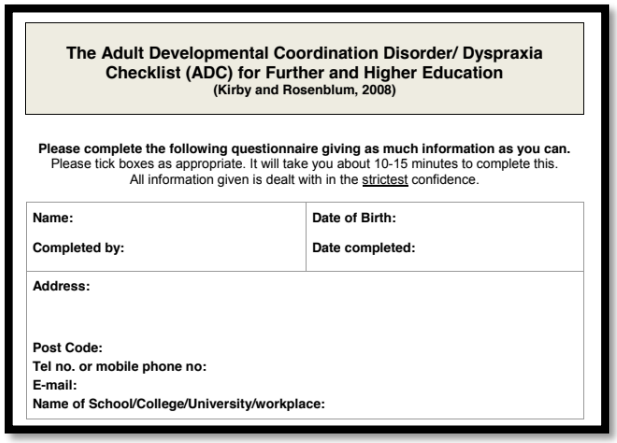
그림 3. 신경-혈관 커플링 매커니즘

III. 연구 방법

1. 실험 참여자

모든 참여자들은 신경학적 기능의 장애를 진단받은 기록이 없는 만 23세 이하의 오른손잡이 성인들로 구성되었다. 이들은 발달성협응장애를 선별하는데 있어 가장 널리 사용되는 The Adult Developmental Co-ordination Disorder/Dyspraxia Checklist (i.e., ADC)(Kirby et al., 2010)와 운동평가도구인 MABC-2 (Movement Assessment Battery for Children)를 기준으로 구분되었으며, 각 그룹당 15명씩 배정되었다. 본 연구 진행에 앞서 모든 연구 참여자들에게 실험을 설명하고 동의를 받았다.

본 연구는 서울대학교 생명윤리위원회의 승인을 얻어 진행했다(IRB No. 2302/002-010).



The Adult Developmental Coordination Disorder/ Dyspraxia Checklist (ADC) for Further and Higher Education
(Kirby and Rosenblum, 2008)

Please complete the following questionnaire giving as much information as you can.
Please tick boxes as appropriate. It will take you about 10-15 minutes to complete this.
All information given is dealt with in the strictest confidence.

Name: **Completed by:**	**Date of Birth:** **Date completed:**
Address: **Post Code:** **Tel no. or mobile phone no:** **E-mail:** **Name of School/College/University/workplace:**	

그림 4. ADC 설문지

그림 5. MABC-2 평가도구

2. 실험 장비

1) 다중 손가락 힘 측정 장비

엄지를 제외한 오른손 4개 손가락 끝의 수직력(Normal force)을 측정하기 위해, 네 개의 단축 힘 변환기(Model 208A03, PCB Piezotronics Inc. Depew, NY, USA)를 사용하였다. 힘 변환기 네 개는 자체 제작 알루미늄 패널(panel, size: 140 x 90 x 5mm3)에 설치되었다. 실험 데이터는 자체 제작된 LabView 프로그램(National Instrument, Austin, TX, USA)를 이용해 수집했으며, 아날로그-디지털 변환기(NI USB-6225, National Instruments, Austin, TX)를 통해 500Hz의 수집빈도(sampling rate)로 디지털화(digitizing)했다.

그림 6. 단축 힘 센서

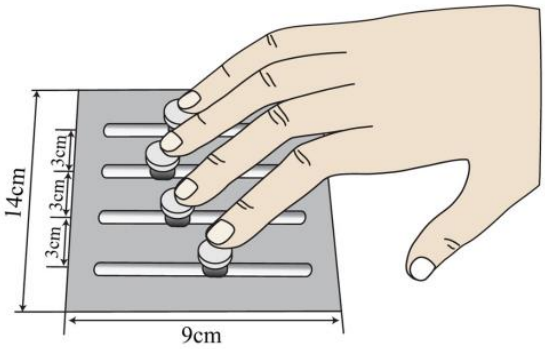


그림 7. 단축센서 고정용 알루미늄 패널

2) 전두엽피질 산소포화도 측정 장비

전두엽 피질의 산소포화도(hemodynamics)를 측정하기 위해 비침습적 근적외선 분광장치(NIRSIT, OBELAB, Seoul, Korea)를 사용할 것이다. 해당 장비의 수집빈도는 8.138Hz이며, Source-detector (SD)의 길이를 3cm로 설정하여 (Scholkmann et al., 2014) 총 48개의 채널을 이용하여 피험자의 이마부분에 위치한 전두엽피질의 활성도를 측정하였다.

그림 8. OBELAB fNIRS 장비

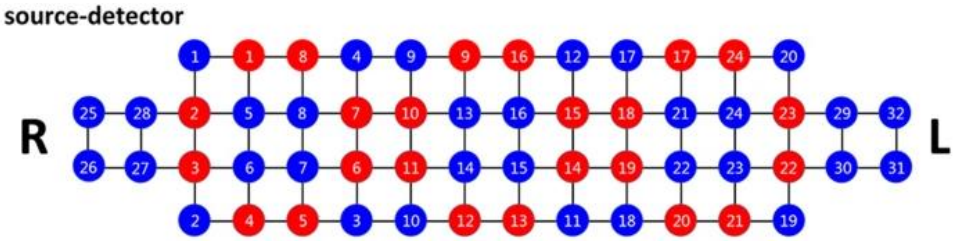


그림 9. source-detector 구성도

3. 실험 과제 및 절차

컴퓨터 화면 (27-inches, 1,920 x 1,080 resolution at 60Hz)을 설치하여 연구 참여자가 과제로 주어지는 목표 힘 템플릿과 실시간으로 화면에 표출되는 손가락 힘을 확인할 수 있도록 하였다. 또한, 높이가 조절되는 의자를 통해 연구 참여자가 최대한 본인의 눈높이에 맞게 화면을 바라볼 수 있도록 하였으며, 손가락 끝이 힘 센서에 알맞게 닿을 수 있도록 세팅하였다.

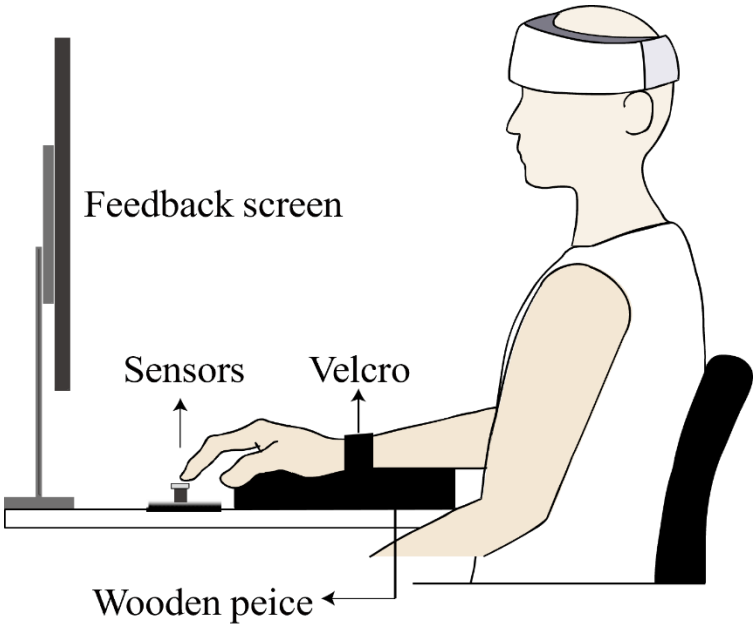


그림 10. 실험환경

1) 최대 힘 생성 과제(Maximum Voluntary Contraction Force Production Task)

최대 힘 생성 과제는 네 손가락의 최대 수축력을 측정하는 과제로, 네 손가락들이 최대한으로 생성해낸 힘들의 총합으로 구성된다. 이는 연구 참여자 개인이 가진 최대 힘(100%)를 측정함과 동시에 주기적인 목표값에 맞춰 손가락 힘을 생성하는 과제의 템플릿 (MVC 5~10% 진폭의 sinusoidal-wave)을 설정하는데 사용된다.

해당 과제는 총 2회, 3초씩 실시될 것이며, 피로의 영향을 피하기 위해 시도 간 5분의 휴식시간을 제공하였다.

2) 주기적 손가락 힘 생성 과제 (Multi-finger cyclic Force Production Task)

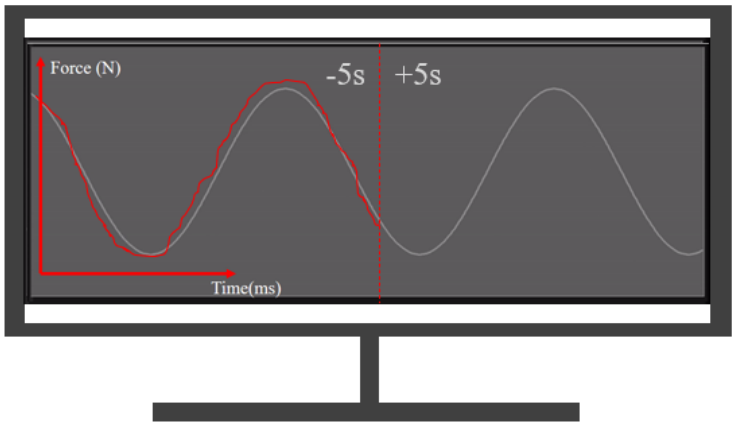


그림 11. 과제 템플릿

피험자는 네 손가락을 이용하여 모니터에 최대수축력의 5~10 %의 진폭을 가진 주기적인(0.5Hz) 사인파(sinusoidal-wave) 형태의 목표 힘 값에 따라 합력을 3분(180초)동안 맞추는 과제를 수행한다. 피험자는 총 3회 시도를 수행하였으며, 각 시도간 5분의 휴식 시간을 제공받았다.

4. 분석 변인

1) f_NIRS 데이터

(1) 산소포화도

실험을 통해 얻은 데이터는 자체 제작한 MATLAB (MathWorks Inc., Natick, MA, USA) 코드를 이용하여 분석했다. 노이즈의 영향을 배제하기 위해, SNR(signal to noise ratio) 수치가 30dB 이상인 채널에서 수집된 데이터만 분석에 이용하였다. 수치가 고주파 기기 및 주변 노이즈를 제거하기 위해 원본 데이터(raw data, light intensity)는 0.1 ~ 0.005 Hz의 주파수 범위를 가진 이산 코사인 변환을 사용하여 필터링되었다. 필터링 된 광학밀도(optical density) 데이터에서 옥시헤모글로빈 수치를 계산하기 위해, 수정된 비어-람버트 법칙(Modified Beer-Lambert law: MBLL)을 이용하였다 (Delpy et al.,1988).

(2) 기능적 연결성(Functional connectivity)

각 채널에서 수집된 옥시헤모글로빈의 수치를 기반으로 영역간 기능적 연결성을 분석하였다. 48개의 채널 간 연결성을 확인하기 위해 피어슨 상관관계를 이용하여 분석을 진행하였다. 데이터의 유의성을 확보하기 위해 다음의 기준을 세웠다(Yu et al., 2020). (1. 본페로니 교정 방법, 유의성 $p \leq 0.05$ 2. 상관계수 $r \geq 0.7$)

2) 평균 절대 오차(Mean Absolute Error: MAE)

평균 절대 오차는 모델과 실제 값의 오차를 직관적으로 확인하기 위해 실시되는 분석 방법이다. 정해진 구간에서의 모델과 실제 값 간의 오차를 절대값을 취한 후 평균 낸 값으로, 본 연구에서는 주어진 템플릿(T_i)와 실제 힘 값(F_i)간의 확인하기 위하여 실시되었다. 수식은 아래와 같다. 여기서 n은 샘플 수를 나타낸다.

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|T_i - F_i| \qquad (1)$$

3) 변동계수(Coefficient of Variation: CV)

변동계수(Coefficient of Variation)는 상대적인 측도로써, 표준편차를 해당 데이터의 평균값으로 나눈 값이다. 이는 평균에 대한 상대적인 변동 정도를 나타내는 지표로 변동계수의 값이 작으면 데이터의 분포가 상대적으로 안정적이고, 값이 크면 데이터의 분포가 불안정하다는 것을 나타낸다.

(1) 정밀성 변동계수

전체 주기적 힘 생성 과제에서 각 하나의 개별 주기마다의 로컬 피크값(최대, 최소값)을 생성하는 손가락 합력의 일관성을 정량적으로 확인하기 위해 실시되었다. 수식은 아래와 같다.

$$CV_{pre}(\%) = \left(\frac{S_{Peak,\ trough}}{\bar{X}_{Peak,\ trough}}\right) \times 100 \qquad (2)$$

(2) 정확성 변동계수

전체 주기적 힘 생성 과제에서 각 하나의 개별 주기마다의 로컬 피크값(최대, 최소값)을 생성하는 손가락 합력과 과제로 주어진 템플릿의 피크 값과의 차이에 대한 변동계수를 계산하여 과제수행의 정확성을 정량적으로 확인하기 위해 실시되었다. 수식은 아래와 같다. (p_n: 하나의 주기의 로컬 최대 피크값, t_n: 하나의 주기의 로컬 최소 피크값)

$$\bar{X}_p = \frac{\sum_{i=1}^{n} p_n - (0.1 * MVC)}{n} \qquad (3)$$

$$\bar{X}_T = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_n - (0.05 * MVC)}{n} \qquad (4)$$

$$S_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(p_n - \bar{X}_p\right)^2}{n-1}} \qquad (5)$$

$$S_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(t_n - \bar{X}_p\right)^2}{n-1}} \quad (6)$$

$$CV_{acc}(\%) = \left(\frac{S_{p,t}}{\bar{X}_{P,T}}\right) \times 100 \quad (7)$$

4) 상대 위상(Relative phase: RP)

상대 위상은 동일한 주파수의 두 주기적 파형 간의 위상 차이를 나타낸다. 다시 말해 두 파동 사이의 정렬 또는 동기화를 측정한 것이다. 만약 두 파동의 위상이 같으면 최고점과 최저점이 동시에 발생하게 되고 이에 따라 상대 위상은 0도가 된다(in-phase synchronization). 하지만 최고점과 최저점이 서로 다른 시간에 발생하게 되면 상대위상은 180도에 가까워지고 역위상(anti-phase synchronization)의 형태를 띈다.

이러한 상대 위상 산출식을 이용하여, 연구참여자가 생성한 손가락 합력과 피드백으로 주어진 템플릿 간의 정렬 정도를 확인하기 위한 분석 변인으로 사용하였다.

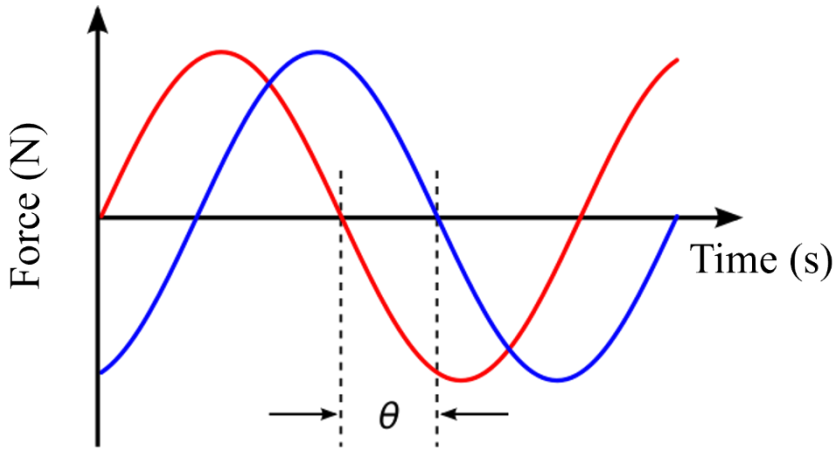


그림 12. 상대 위상 예시

5) 시너지 지수(Synergy index: ΔV_z)

실험을 통해 얻은 데이터는 자체 제작한 MATLAB (MathWorks Inc., Natick, MA, USA) 코드를 이용하여 분석했다. 계산에 앞서 원본 데이터(raw data)는 zero-lag, 6Hz 4th-order low-pass Butterworth filter를 이용하여 필터링한 후, 아래의 공식들을 통해 가설 검증을 위한 변수들을 계산했다.

UCM 분석에는 두 가지 종류의 분산이 존재한다(V_{UCM} 와 V_{ORT}). 각 분산(요소변인)의 변화(ΔEV)의 합은 과제(수행변인)의 변화(ΔPV)를 나타낸다. 여기서 요소 변인은 Force field에서의 각 손가락들의 force vector를 의미하며, 수행 변인은 전체 합력(F_{TOT})을 의미한다.

$$\Delta PV = J \cdot \mathbf{\Delta} EV \tag{8}$$

비제어 다양체 공간(영공간)은 수행 변인을 변화시키지 않는 요소 변인의 공간 내 존재하는 unit vector(e_i)로 정의된다.

$$0 = J \cdot e_i \tag{9}$$

실험을 통해 얻어진 손가락 힘의 조합들은 비제어 다양체 공간 (UCM) 공간에 평행하는 비제어 다양체 공간과($f_{\parallel}$) 직교공간($f_{\perp}$)에 각각 선형 투영된다.

$$f_{\parallel} = \sum_{i}^{n-p} (e_i^T \cdot dm)\, e_i \tag{10}$$

$$f_{\perp} = dm - f_{\parallel} \tag{11}$$

여기서 n은 각 요소변인의 자유도 수를 나타내며, p는 수행변인의 자유도 수를 나타낸다. 상첨자 T는 전치행렬로의 변환을 의미한다. dm는 네 손가락 힘의 조합을 나타내는데, 손가락 힘 조합들의 평균값을 원 값에 뺀 값이다(mean free values / demean). 따라서 f는 손가락

힘들이 반복수행에 의해 계산된 평균값으로부터 얼마나 벗어나는지를 나타낸다(Schöner 1995; Scholz and Schöner 1999; Scholz et al. 2000; Latash et al. 2002).

UCM에 평행한 분산(V_{UCM})과 UCM에 직교하는 분산(V_{ORT})은 다음과 같이 계산된다.

$$V_{ucm}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{cycle}} |f_{\parallel}|^2}{(n-p)N_{cycle}} \tag{12}$$

$$V_{ort}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{cycle}} |f_{\perp}|^2}{p \cdot N_{cycle}} \tag{13}$$

시너지 지수는 V_{TOT}(총 분산)에 대한 V_{UCM}의 상대적인 크기를 의미한다. 반복 측정하여 얻은 데이터의 V_{TOT}은 V_{UCM}과 V_{ORT}의 합과 같으며, 공간(UCM 또는 ORT)에 해당하는 자유도로 분산들을 표준화(normalization)했다.

$$\Delta V(t) = \frac{V_{ucm}(t) - V_{ort}(t)}{(V_{ucm} \times 3 + V_{ort} \times 1)/4} \tag{14}$$

5. 통계 처리

통계는 성인 발달성협응장애 집단과 통제집단의 집단간 차이와 과제 수행 시간에 따른 차이를 보기 위해, mixed-design ANOVAs with repeated measure를 진행하였다. 요인은 집단(DCD집단/통제집단)과 시간(1~20%, 21~40%, 41~60%, 61~80%, 81~100%)으로 설정하였으며, 모든 통계적 검증의 유의 수준은 $p < 0.05$로 설정하였다.

IV. 연구 결과

본 연구의 목적은 2가지이다. 1) 다중 손가락 힘 생성 과제와 전두엽 활성도 측정 장비를 통해 확인할 수 있는 측정 변인들로 주의집중력의 영향을 정량화 하고, 2) 일반 성인 그룹(대조군)과의 비교를 통해 성인 DCD그룹의 움직임 특성을 정량적으로 확인해보는 것이다.

이를 위해, 본 장에서는 최대 힘 생성 과제에서 산출한 그룹간 최대 힘의 차이와 수행 전·후의 힘 크기 차이 비교 결과 그리고 다중 손가락 주기적 힘 생성과제의 산출 변인인 f_NIRS 데이터, 수행 변인, 협응 변인의 결과를 순서대로 서술했다.

연구 결과는 최대 자발적 수축력(MVC) 생성 과제, 주기적(Cyclic) 손가락 힘 생성 과제 순으로 서술하였다.

1. 최대 힘 생성 과제에 대한 연구결과

1) 최대수축력(MVC force) 비교

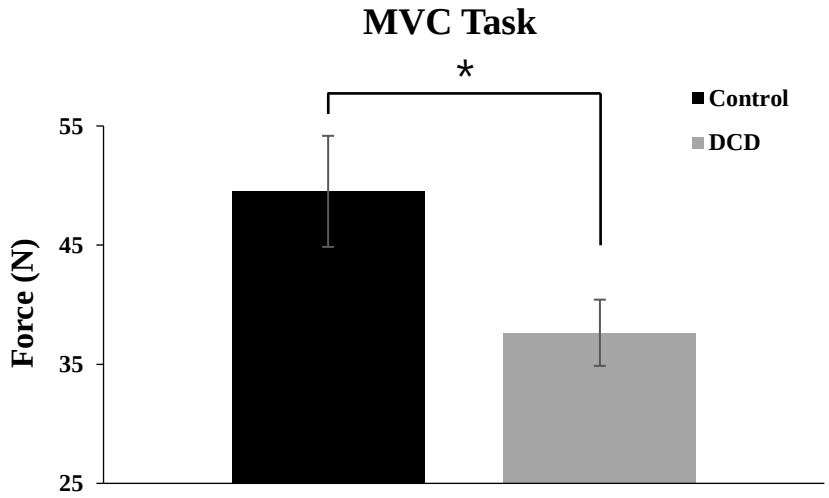


그림 13. 최대 수축력 비교

본 연구에서 측정한 최대수축력은 DCD 집단이 통제 집단보다 76% 더 작았다. 통제집단과 DCD 집단의 최대수축력의 값(mean±SE)은 각각 49.51±4.66N / 37.64±2.78N 이다. 독립표본 t-검정 (independent t-test) 결과 두 그룹간 유의미한 차이(t(22.839)= 2.187, p <.05)를 확인하였다.

2) 최대수축력(MVC force) 전 · 후 비교

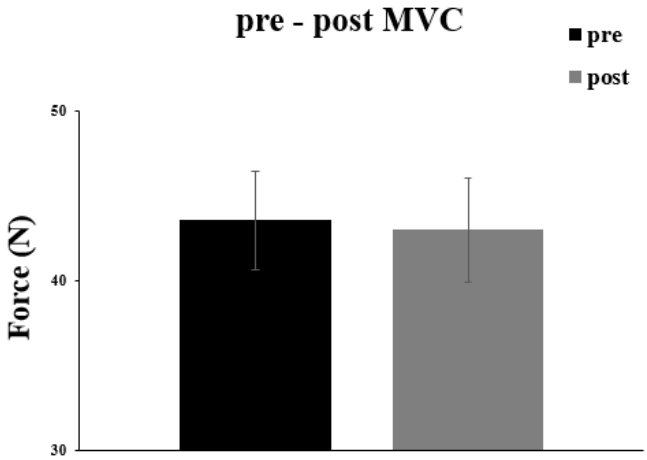


그림 14. 최대 수축력 전 · 후 비교

모든 실험을 마친 후, 실험 데이터에 피로의 영향이 개입되었는지에 대해 확인하기 위해 실험 진행 전과 후의 최대수축력 값을 이용한 종속 t-검정을 실시하였다. 실험 진행 전과 후의 힘 값은 각각 43.57±2.89N / 43.01±3.06N 으로 유의한 차이를 나타내지 않았다.

2. 주기적 힘 생성 과제에 대한 연구결과

1) f_NIRS 데이터

(1) 전두엽피질 산소포화도 (Oxy – Hemoglobin: HbO)

주기적 힘 생성 과제 동안 전두엽의 산소포화도를 f_NIRS 장비를 통해 측정하였다. 총 180초의 과제 진행시간을 5개의 구간(phase)로 나눠 각 구간의 시계열 데이터의 평균값을 구간 대표값으로 설정하였다. 해당 데이터를 통해 그룹과 시간의 흐름에 따른 차이를 확인하기 위해 Mixed-design 이원반복분산분석 (Mixed-design ANOVAs with repeated measure)을 진행하였다.

위 그림은 총 48개의 채널에서 수집된 데이터를 나타낸다. 해당 영역에서의 분석은 그룹과 시간, 모두에서 유의한 주효과는 나타나지 않았다.

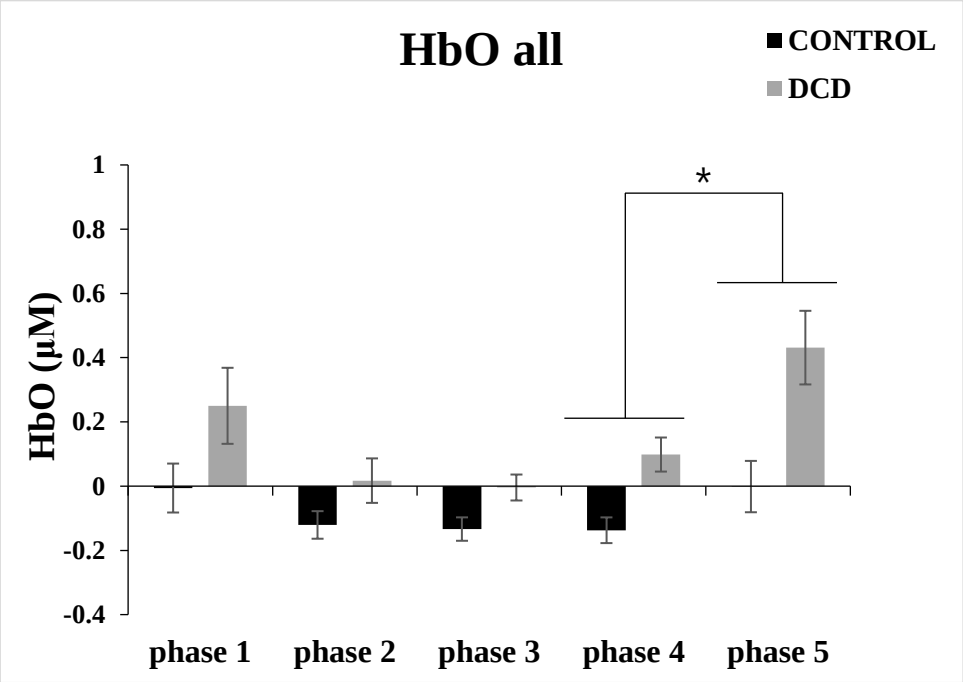


그림 15. HbO (all channel)

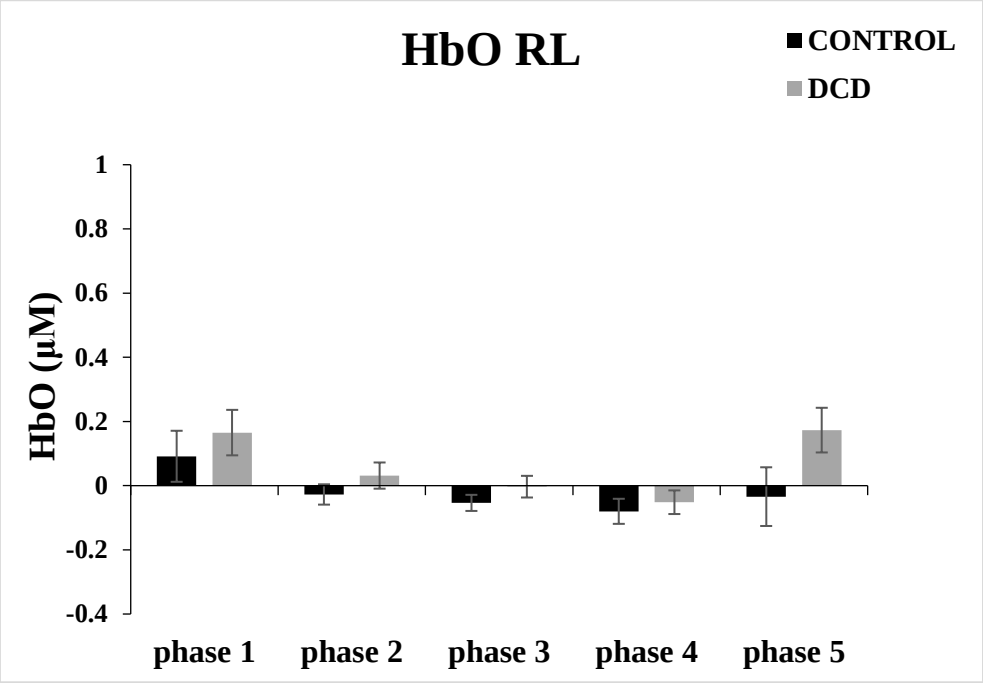


그림 16. HbO (오른쪽 외측)

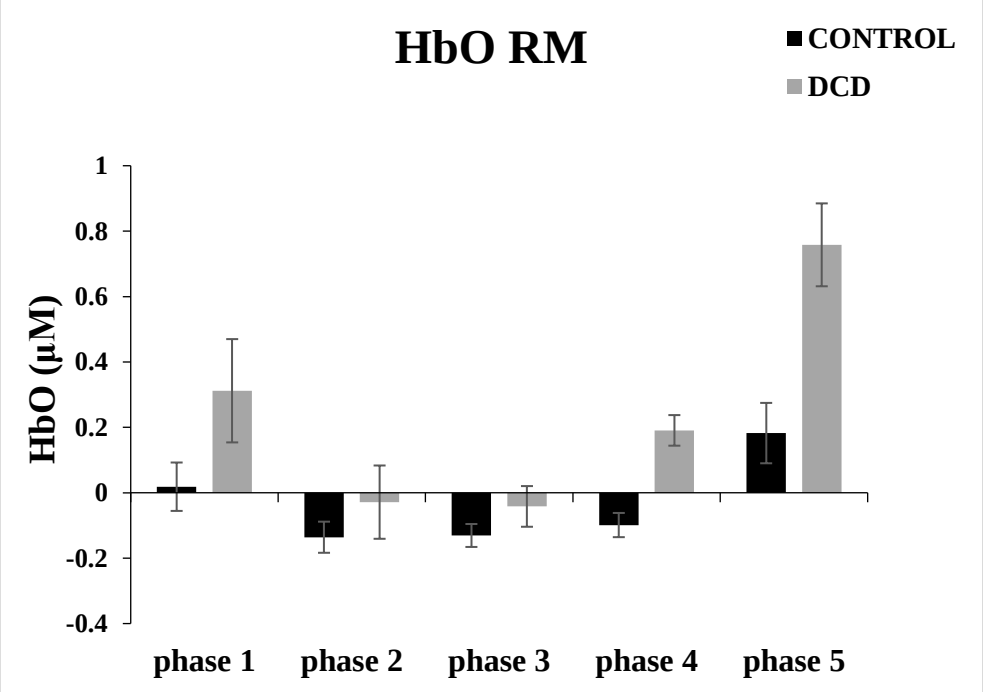


그림 17. HbO (오른쪽 내측)

위 두개의 그림은 4개의 관심영역(ROI)으로 나눈 채널들 중 오른쪽 반구영역(R: Right; L: Lateral; M: Medial)에 해당되는 데이터를 나타낸다. 위 두 영역에서 그룹과 시간 모두에서 유의한 주효과는 나타나지 않았다.

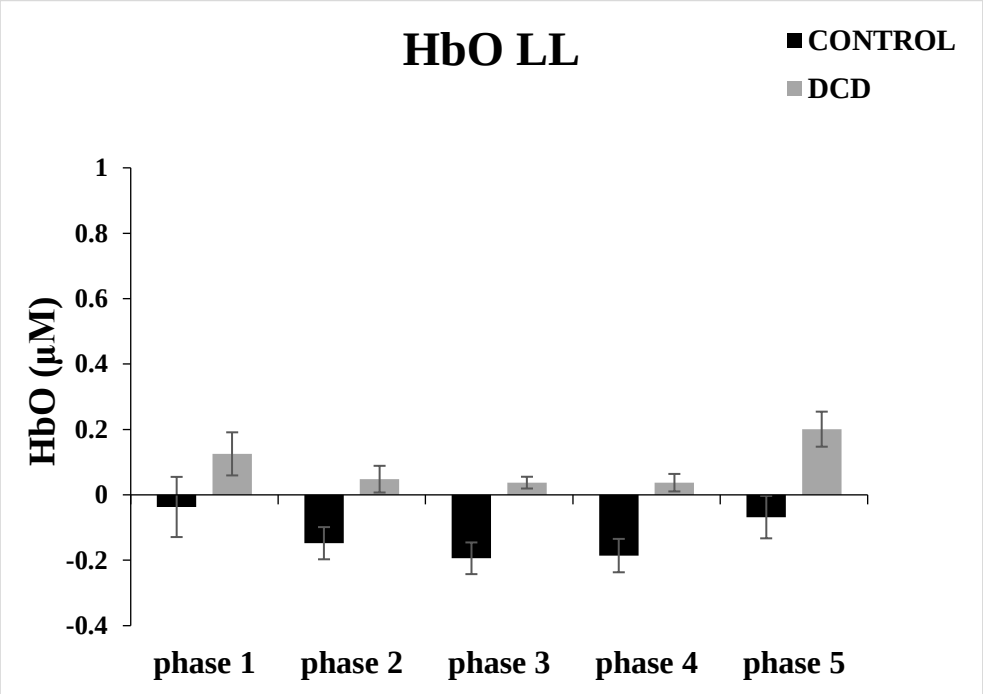


그림 18. HbO (왼쪽 외측)

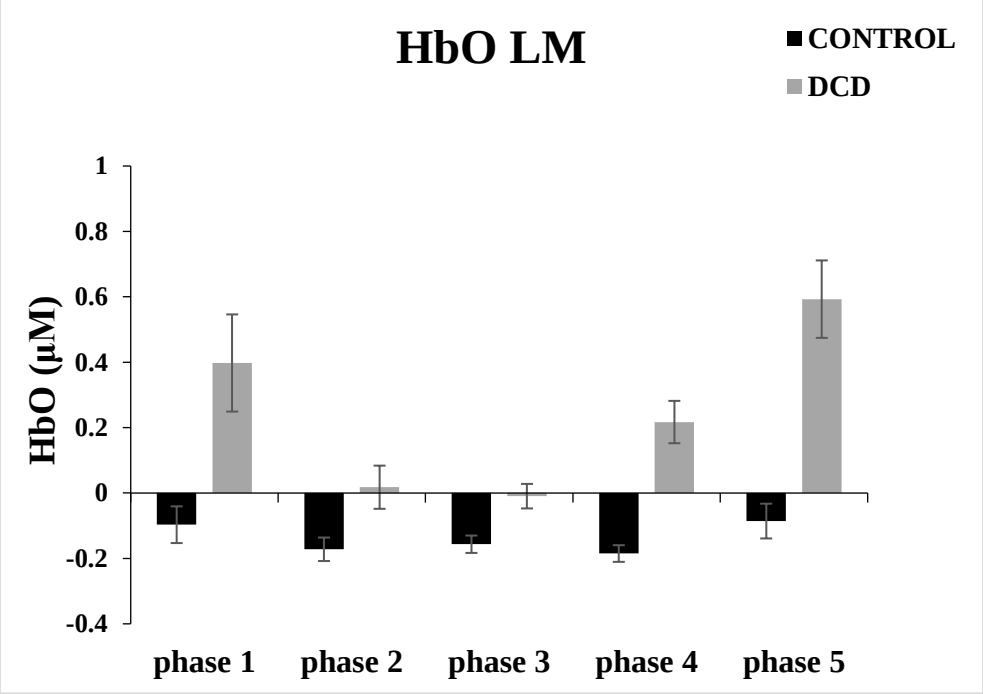


그림 19. HbO (왼쪽 내측)

위 두개의 그림은 4개의 관심영역(ROI)으로 나눈 채널들 중 왼쪽 반구영역(L: Left; L: Lateral; M: Medial)에 해당되는 데이터를 나타낸다.

왼쪽의 내측(Left Medial)부분에서는 그룹과 시간 모두에서 유의한 주효과가 나타나지 않았지만, 왼쪽의 외측(Left Lateral)부분에서는 그룹에 대한 주효과가 나타났다($F_{[1,28]}$ = 5.228, p = 0.03, ηp^2 =. 157).

아래의 그림은 각 그룹의 구간별 전두엽피질 산소섭취량을 컬러맵으로 나타낸 것이다. 그림에서 보이듯, 통제집단과 DCD집단 모두 초기와 말기 구간에서 더 많은 양의 산소를 소비하는 것으로 보여지며, 통제집단에 비해 DCD집단이 모든 구간에서 더 많은 산소를 소비하고, 그 특징은 전두엽의 내측(medial)부분에서 도드라지게 나타나는 것으로 확인되었다.

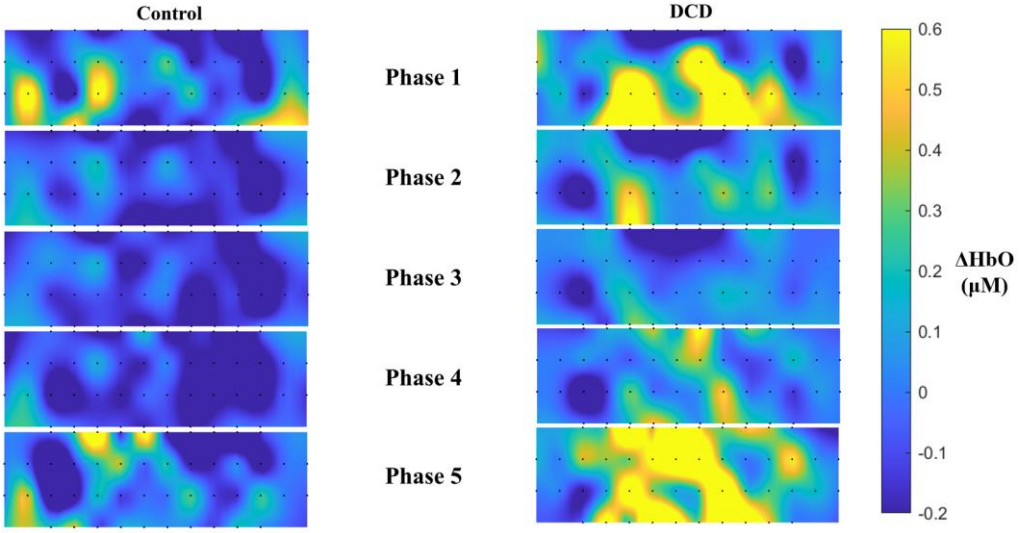


그림 20. 그룹간 산소소비량 비교 컬러맵

아래 그림들은 이러한 각 그룹의 상이한 산소소비의 경향성을 정량적, 통계적으로 확인하기 위해 회귀분석을 이용한 커브 피팅의 결과이다.

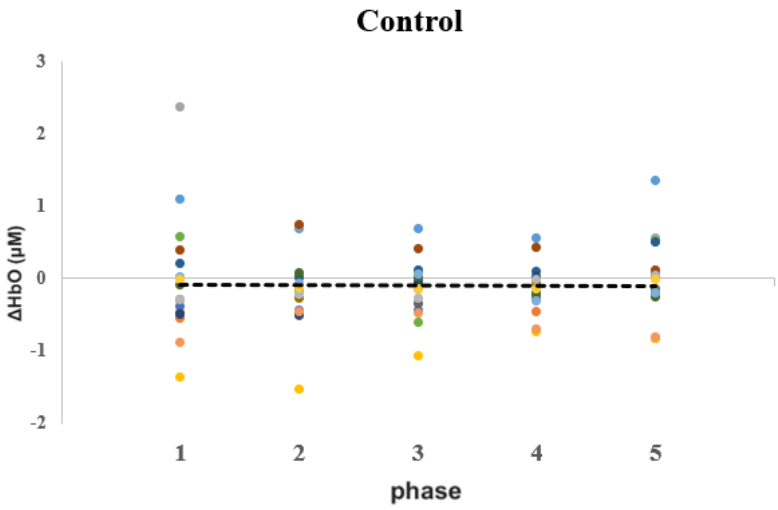


그림 21. 통제집단 산소소비패턴

먼저 통제그룹의 경우 각 구간별 산소소비패턴은 통계적으로 유의한 특징을 나타내지 않았다.

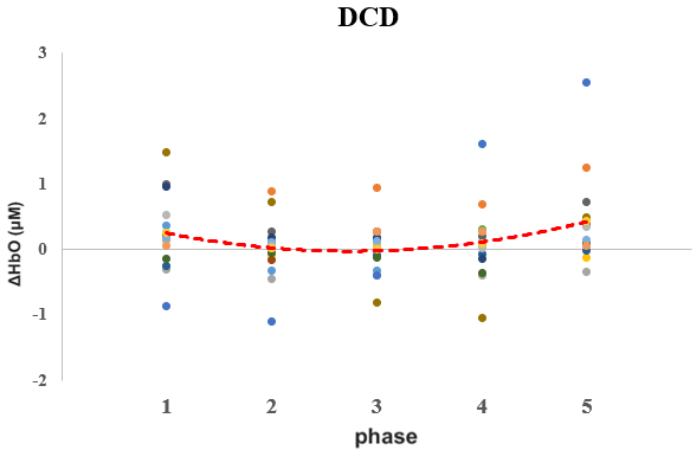
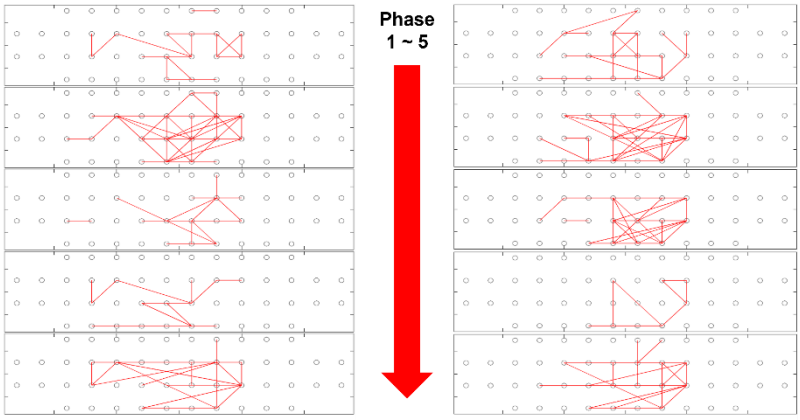


그림 22. DCD집단 산소소비패턴

그러나, DCD의 경우 과제 초기와 말기에 더 많은 산소를 소비하는 quadratic형태의 U자형 패턴을 보였다(P <.05, R = .292, R^2 = .085).

(2) 전두엽피질 기능적 연결성 (Functional connectivity: FC)



The number of FC		
control	DCD	Percentage Difference (dcd)
20	25	+ 25%
50	34	- 32%
17	34	+ 100%
15	12	- 20%
26	36	+ 38%

그림 23. 그룹별 기능적 연결성 비교

f_NIRS로 측정한 48개의 채널들 간의 상관관계 분석을 통해 전두엽피질의 기능적 연결성을 확인하였다. 그 결과 구간 1,3,5에선 DCD집단이 통제집단에 비해 더 많은 수의 기능적 연결 수를 가졌으며, 전체 구간 평균에서도 DCD집단이 통제집단에 비해 많은 수의 기능적 연결성을 가진 것을 확인할 수 있었다.

2) 절대평균오차

절대평균오차는 정해진 구간에서의 모델과 실제 값 간의 오차를 절대값을 취한 후 평균 낸 값으로, 주어진 템플릿와 실제 힘 값 간의 확인하기 위하여 실시되었다. 분석은 하나의 주기를 생성하는데 있어 힘을 증가하는 구간(F_{up})과 힘을 감소하는 구간(F_{dw})으로 구분하여 진행하였다. 결과는 아래와 같다.

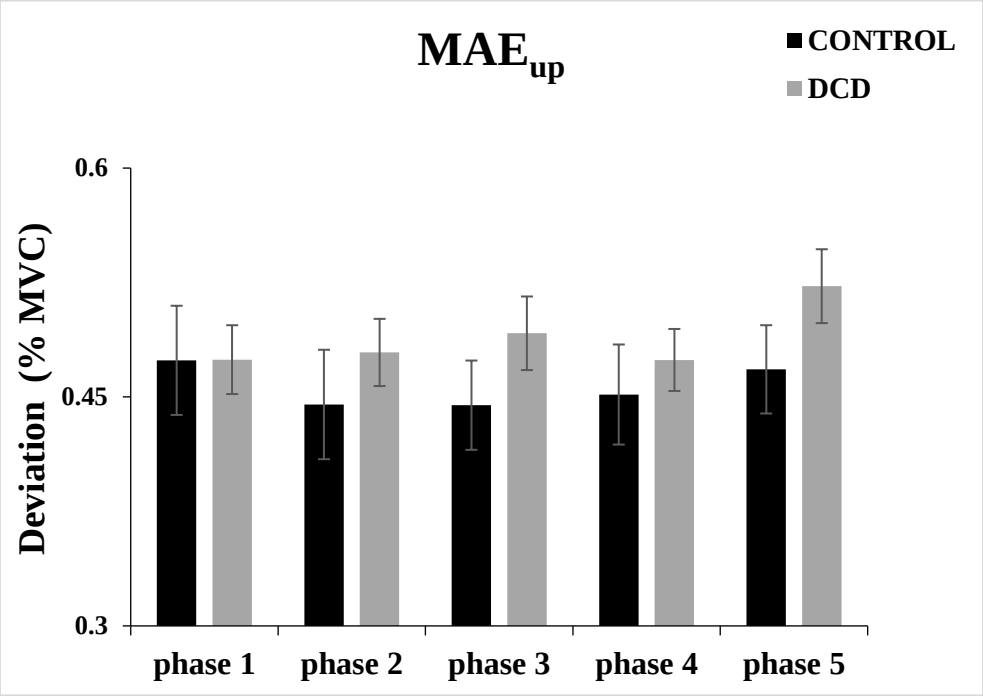


그림 24. 절대평균오차(up) 결과

먼저 힘을 증가하는 구간(F_{up})에서의 결과이다. 해당 분석에서 그룹 주효과는 나타나지 않았으며, 구간 주효과를 확인할 수 있었다($F_{[2.483, 69.515]} = 3.366$, $p = .031$, $\eta p^2 = .107$).

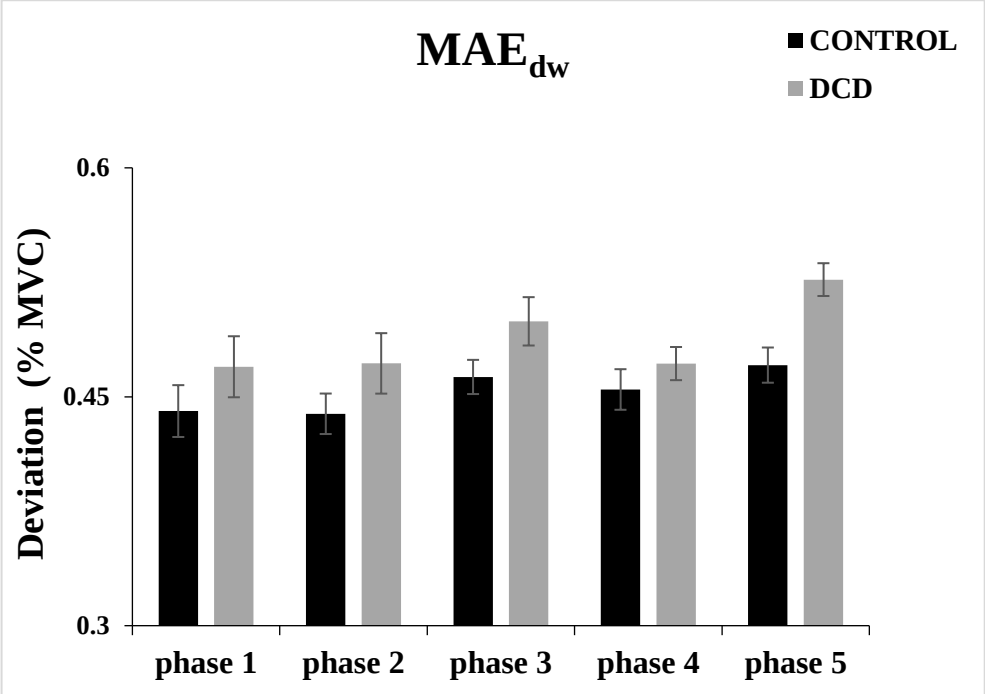


그림 25. 절대평균오차(dw) 결과

힘을 감소하는 구간(F_{dw})에서의 결과이다. 그룹 주효과는 나타나지 않았으며, 구간 주효과를 확인할 수 있었다($F_{[2.021, 56.584]}$ = 5.798, p = .005, ηp^2 = .172).

3) 상대위상

연구참여자가 생성한 손가락 합력과 피드백으로 주어진 템플릿 간의 정렬 정도를 확인하기 위한 분석 변인으로 사용하였다.

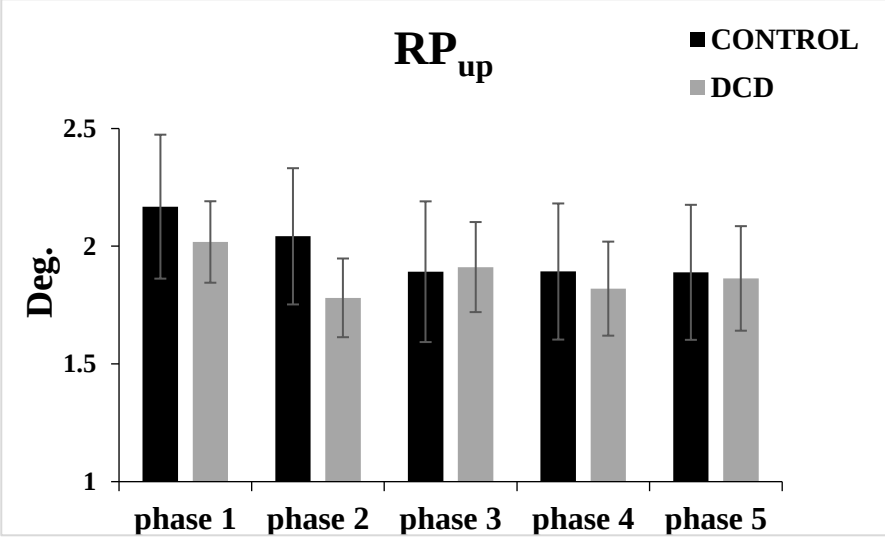


그림 26. 상대위상(up) 결과

먼저 힘을 증가하는 구간(F_{up})에서의 결과이다. 해당 분석에서 그룹 주효과는 나타나지 않았으며, 구간 주효과를 확인할 수 있었다($F_{[4,112]}$ = 3.352, p = 0.012, ηp^2 = .107).

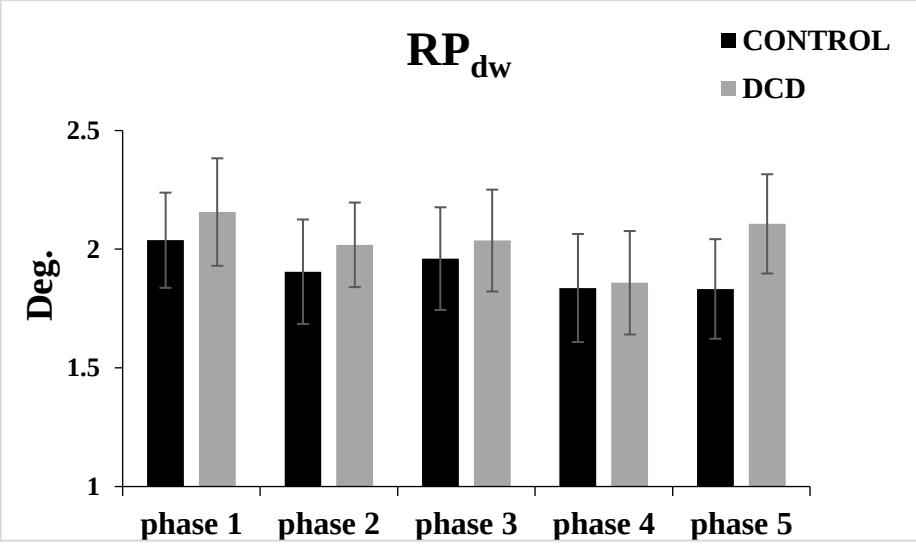


그림 27. 상대위상(dw) 결과

힘을 감소하는 구간(F_{dw})에서의 결과이다. 그룹 주효과는 나타나지 않았으며, 구간 주효과를 확인할 수 있었다($F_{[4,112]}$ = 3.137, p = 0.017, ηp^2 = .101).

4) 변동계수

(1) 정확성 변동계수

전체 주기적 힘 생성 과제에서 각 하나의 개별 주기마다의 로컬 피크값(최대, 최소값)을 생성하는 손가락 합력과 과제로 주어진 템플릿의 피크 값과의 차이에 대한 변동계수를 계산하여 과제수행의 정확성을 정량적으로 확인하기 위해 실시되었다.

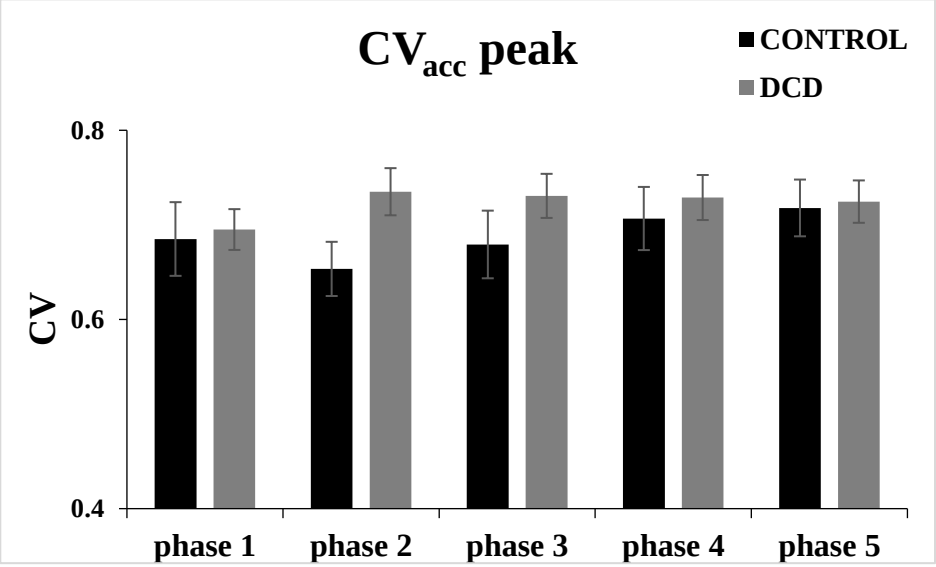


그림 28. 정확성 변동계수(peak) 결과

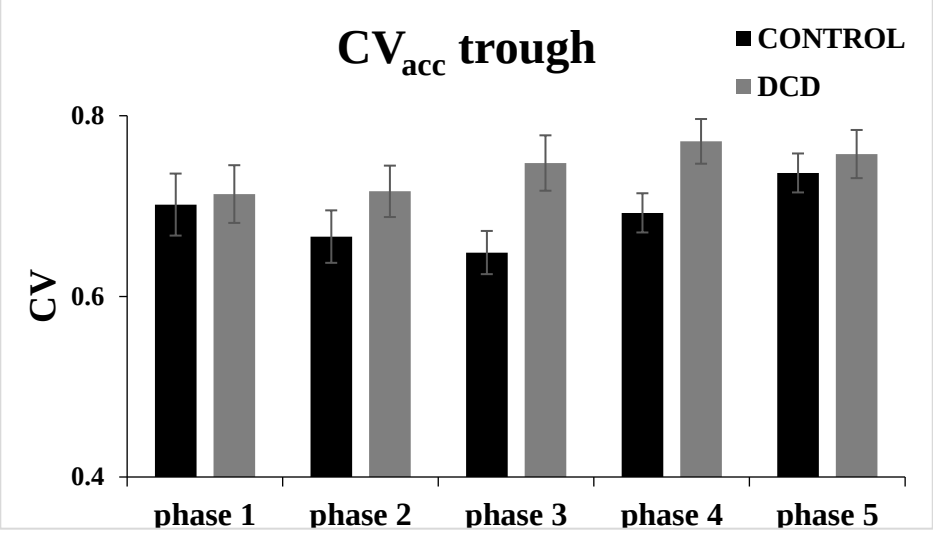


그림 29. 정확성 변동계수(trough) 결과

두 조건 모두에서 통계적으로 유의한 차이는 없었다.

(2) 정밀성 변동계수

전체 주기적 힘 생성 과제에서 각 하나의 개별 주기마다의 로컬 피크값(최대, 최소값)을 생성하는 손가락 합력의 일관성을 정량적으로 확인하기 위해 실시되었다.

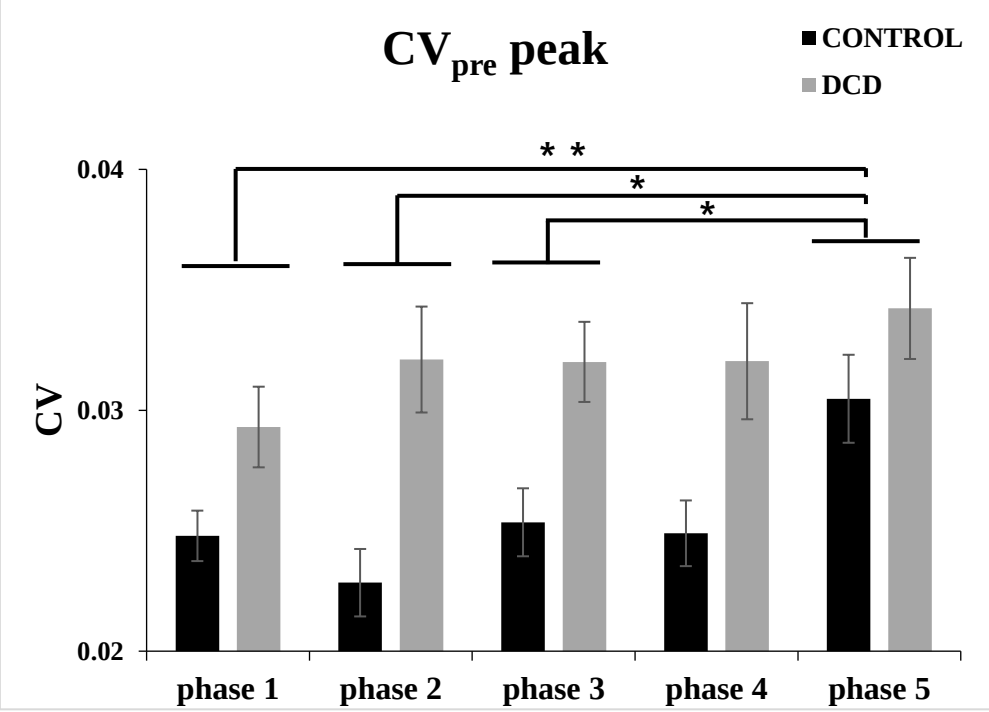


그림 30. 정밀성 변동계수(peak) 결과

먼저 힘을 증가하는 구간(F_{up})에서의 결과이다. 해당 분석결과 모든 요인에서 유의한 주 효과(집단: $F_{[1,28]}$ = 10.669, p = 0.003, ηp^2 = .276; 구간: $F_{[4,112]}$ = 5.648, p < 0.001, ηp^2 = .168)를 확인할 수 있었다.

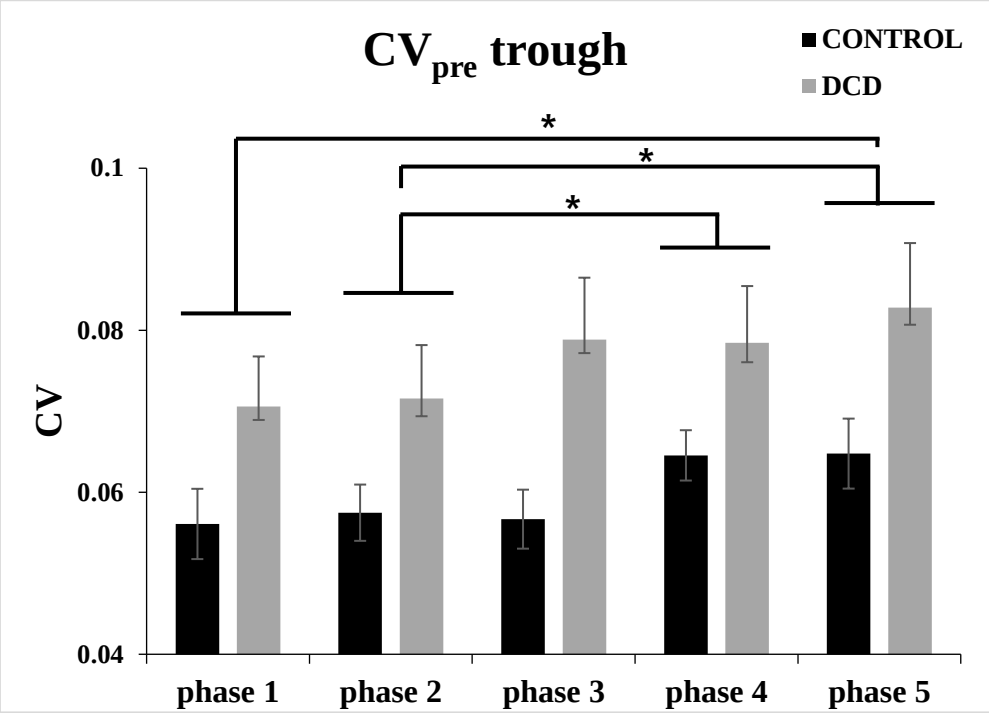


그림 31. 정밀성 변동계수(trough) 결과

힘을 감소하는 구간(F_{dw})에서의 결과이다. 해당 분석결과 모든 요인에서 유의한 주 효과(집단: $F_{[1,28]}$ = 4.972, p = 0.034, ηp^2 = .151; 구간: $F_{[4,112]}$ = 6.358, p < 0.001, ηp^2 = .185)를 확인할 수 있었다.

5) 시너지지수

(1) z변환 시너지 지수

피험자들의 손가락 협응 능력을 정량적으로 확인하기위해 시너지 지수를 산출하였다.

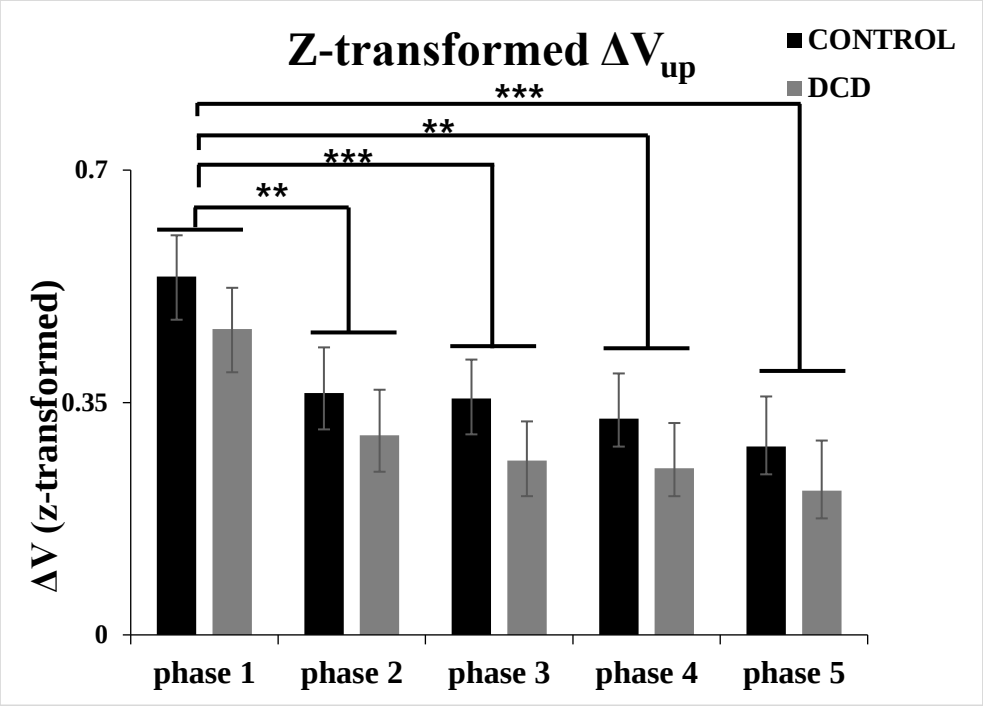


그림 32. ⊿Vz (up) 결과

힘을 증가하는 구간(F_{up})에서의 결과이다. 해당 분석결과 구간에서의 유의한 주 효과($F_{[2.753,\ 77.093]}$ = 11.585, $p < 0.001$, ηp^2 = .293)를 확인할 수 있었다.

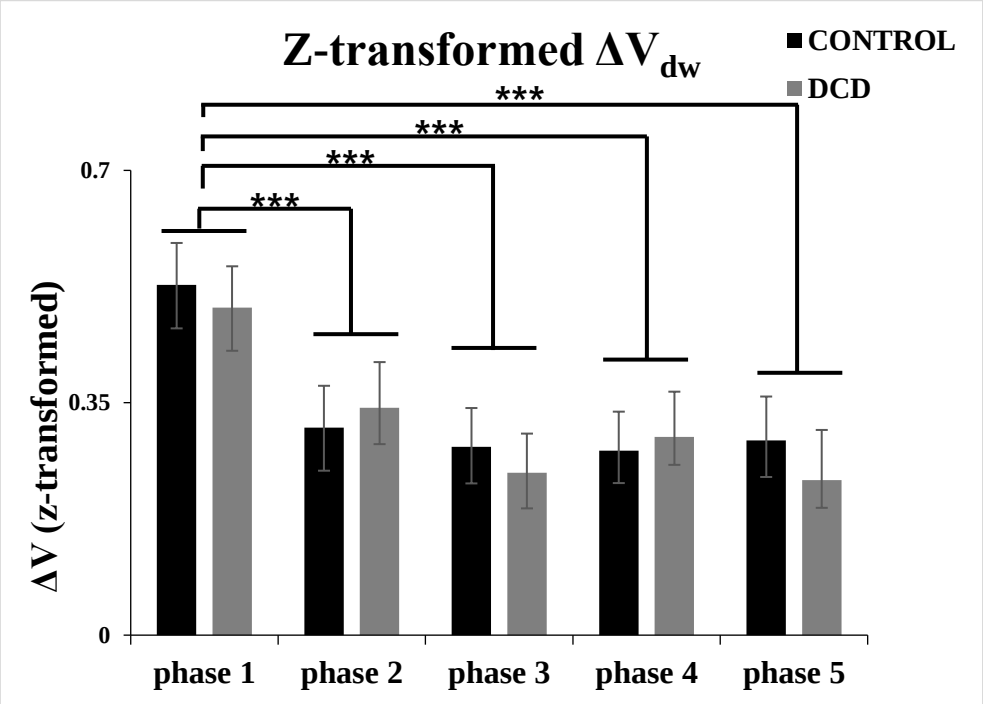


그림 33. ⊿Vz (dw) 결과

힘을 감소하는 구간(F_{dw})에서의 결과이다. 그룹 주효과는 나타나지 않았으며, 구간 주효과를 확인할 수 있었다($F_{[2.593,\ 72.602]}$ = 15.235, p < 0.001, ηp^2 = .352).

(2) UCM 분산

아래는 비제어 다양체 공간에 평행하는 분산에 대한 결과이다.

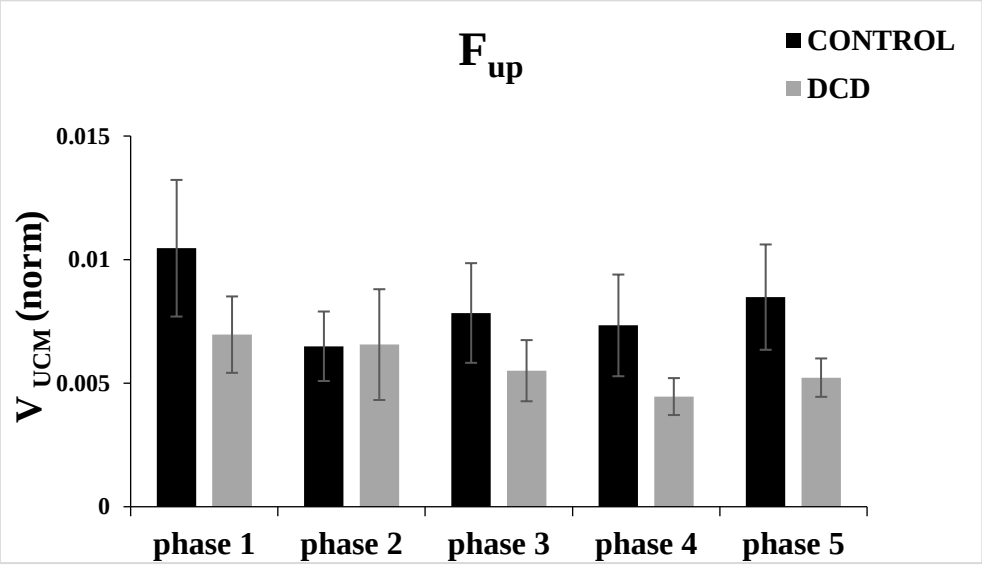


그림 34. V_{UCM} (up) 결과

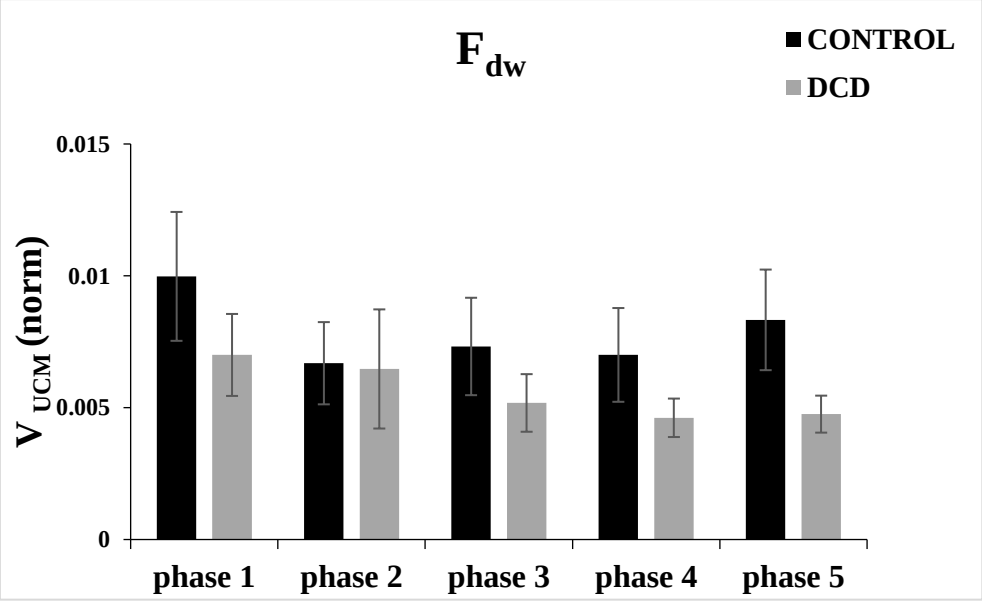


그림 35. V_{UCM} (dw) 결과

두 조건 모두에서 통계적으로 유의한 차이는 없었다.

(3) ORT분산

아래는 비제어 다양체 공간에 직교하는 분산에 대한 결과이다.

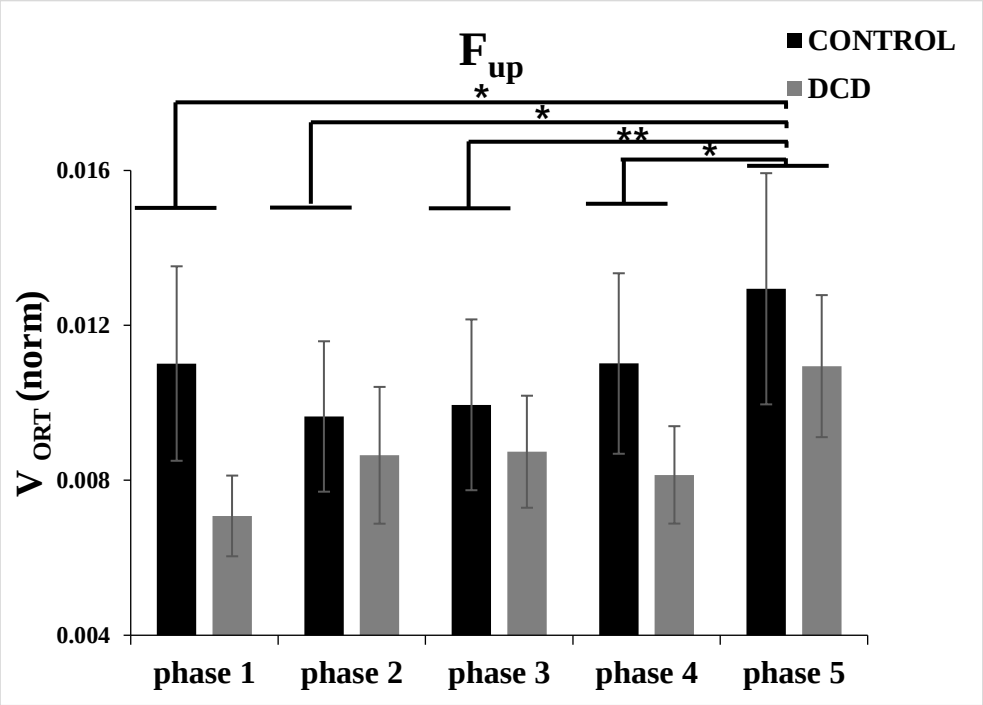


그림 36. V_{ORT} (up) 결과

힘을 증가하는 구간(F_{up})에서의 결과이다. 해당 분석결과 구간에서의 유의한 주 효과($F_{[2.952,\ 82.652]}$ = 7.917, p < 0.001, ηp^2 = .220)를 확인할 수 있었다.

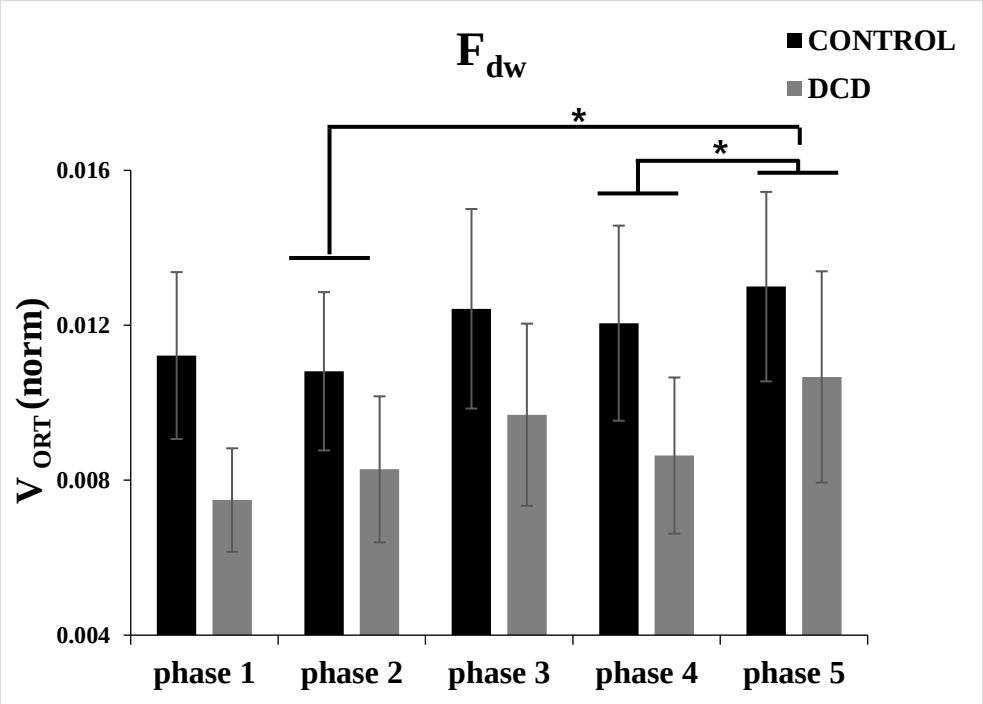


그림 37. V_{ORT} (dw) 결과

힘을 감소하는 구간(F_{dw})에서의 결과이다. 해당 분석결과 구간에서의 유의한 주 효과($F_{[1.835,\ 51.373]}$ = 5.203, p = 0.01, ηp^2 = .157)를 확인할 수 있었다.

V. 논의

1. 성인 발달성협응장애와 전두엽피질 활성도

전전두엽 피질은 피질과립층 IV(cortical granular layer IV)의 존재를 기준으로 전두엽의 앞부분으로 정의된다. 전전두엽 피질(PFC)은 운동 적응 과정에서 인지 과정을 형성하는 데 중요한 역할을 하는 것으로 확인되었다. 물리적으로 전전두엽 피질은 감각계, 운동계, 변연계, 시상핵 등 광범위한 뇌 영역과 연결되어 있다. 이를 기반으로 전전두엽 피질은 지각, 감각 정보를 받아 이전 경험에 의해 형성된 기억을 기반으로 신호를 처리하는 영역으로써 역할을 수행한다. 또한 전두엽 피질과 뇌에서 움직임을 담당하는 영역으로 잘 알려진 운동피질영역은 계획적인 움직임과 움직임 실행과 관련하여 밀접한 관련이 있다. 운동피질영역(M1)의 크고 거대한 피라미드 세포는 근육에 직접 또는 간접적으로 신호를 보내 등쪽 기저핵과 뇌간을 통해 근육 수축을 일으킨다. 동시에 M1은 전두엽 피질, 시상, 시각 피질을 포함한 감각 피질로부터 정보를 받는다.

운동피질영역과 전두엽의 연결성, 그리고 발달성협응장애의 움직임에 대한 뇌 활성도 특징은 발달성협응장애와 통제집단 간의 움직임에 대한 뇌 영역 활성도를 비교한 Bradley D. Hatfield와 Jane E. Clark의 논문에서 잘 나타난다. 해당 논문을 확인해보면, 발달성협응장애 집단의 움직임에서의 차이는 운동피질 영역의 낮은 활성화와 움직임에 관련된 뇌 영역들의 과 활성화 패턴이 주된 원인일 것이라 주장한다. 또한 앞에 얘기했듯, 인간의 자발적인 움직임은 운동피질영역(M1)과 전전두엽 피질을 비롯한 움직임을 보조하는 뇌 영역 간의 연결성 역시 중요한데, DCD의 운동피질영역과 전전두엽 피질간의 연결성은 통제집단에 비해 떨어지는 것을 알 수 있다. 이는 과제를 수행하는데 있어 DCD의 뇌 영역 간의 연결성이 서툰(clumsy)한 움직임에 원인일 수 있다고 생각할 수 있다.

위 논문의 결과와 연결지어 본 연구의 주기적 힘 생성 과제를 수행하는 동안 수집된 f_NIRS 장비의 산소포화도 결과를 보았을 때, 발달성협응장애 집단은 통제집단과 다른 산소소비의 형태를 보였다. 통제집단은 과제를 수행하는데 있어 초기 baseline과 비교하여 큰 차이를 보이지 않았으며, 그 활성도의 유의미한 프로파일 역시 나타나지 않았다. 반면, DCD의 경우 초기 baseline에 비해 초기와 말기에 더 큰 산소섭취량을 가지는 프로파일을 보였다. 이는 본 연구의 연구결과와 같은 맥락에서, 과제수행시 DCD집단이

움직임을 보조하는 뇌 영역 중 하나인 전두엽 피질의 활성화 패턴이 통제집단과 다른 양상을 보이며, 이는 DCD집단이 서툰 움직임의 원인 중 하나가 통제집단과는 다른 전두엽 피질의 산소소비 패턴 때문일 수 있다는 단서를 제공한다.

2. 성인 발달성협응장애와 운동 수행

본 연구의 결과를 살펴보면, DCD는 힘을 반복적으로 증감하는 과제를 수행할 때 힘을 증가하는 구간에서 통제집단에 비해 더 많은 에러를 갖는 것으로 나타났다. 특히 힘을 증가시키는 과정에서 목표 힘 값까지 도달하는 구간의 에러가 통계적으로 그룹간 차이를 가지는 것으로 확인되었다.

또한 주기적 힘 생성 과제에서 각 주기별 피크값(최대, 최소값)을 일정하게 맞추는 것의 일관성을 나타내는 변동계수에서 집단과 시간에 주효과를 나타내는 것을 토대로, 반복적인 과제를 수행할 때 DCD집단이 통제집단에 비해 일정한 힘 값을 역동적으로 생성하는데 어려움이 있다는 사실을 확인할 수 있었으며, 시간이 지날수록 그 정도가 강해진다는 것을 확인할 수 있었다.

DCD는 통제집단에 비해 힘을 일정하게 맞추고 일관성있게 힘을 생성하는 능력이 떨어진다. 이는 시간이 지날수록 그 영향이 더욱 커지는 결과를 보인다. 대부분 알려져있는 집중력의 저하는 시간이 지남에 따라 그 영향력이 커진다. 본 연구는 반복적이고 단순하지만 비교적 길게 과제를 수행하도록 연구참여자들에게 요구되었으며, 피로와 학습효과(learning effect)의 영향을 최소화할 수 있도록 통제되었다. 이러한 실험디자인은 시간이 지남에 따라 집중력이라는 요인이 운동수행에 있어 어떠한 영향을 미치는지 간접적으로 확인할 수 있도록 하였다.

공통적으로 DCD와 통제집단은 협응변인인 synergy index에서 그룹간 차이를 보이지 않았다. 하지만 두 그룹은 전두엽피질의 산소포화도와 힘을 증가시키는 구간의 에러 값에서 집단간 주효과를 가졌다. 이는 정밀성을 평가하는 인덱스인 synergy index을 통해, dcd가 synergy index에서 확인할 수 있는 CNS가 다중 손가락을 통해 힘을 안정화하고 각 손가락들이 협응을 통해 에러를 보완하는 과정에서의 문제가 없다는 것을 말한다. 또한 subcortical disorder 환자들을 대상으로 진행된 synergy index의 저하는 synergy index가 subcortical영역과 밀접한 관련이 있다는 것을 암시한다.

따라서 앞선 내용과 더불어 해석해보자면, DCD는 통제집단과 피질영역에서의 차이를 보이는 것으로 미루어 보아, 운동피질영역에서의 processing이 서툰 움직임의 원인일 가능성이 크다고 사료된다.

3. 집중력과 운동 협응 과제

본 연구는 집중력의 저하를 직접적으로 관찰할 수 있는 장비를 통해 측정하지 못했다는 점과 집중력과 다른 종속 변인들 간의 인과관계를 증명하지 못하였다는 제한점이 존재한다. 때문에 본 실험 프로토콜로 보인 시간의 흐름에 따라 나타난 결과들을 단순 집중력의 영향에 의한 것이라 확언할 수 없다. 그럼에도 불구하고, 장시간 진행한 단순하고 반복적인 과제는 CNS가 움직임을 형성하는데 있어서 집중력이라는 요소가 개입하지 않았다 생각할 수는 없으며, 또 시간이 지남에 따라 집중력이 저하된다는 내용의 연구들은 집중력의 시간의 흐름에 따른 저하 대한 것은 확인할 수 있다. 따라서 시간에 흐름에 따라 각 변인들의 경향성이 달라지는 것이 집중력의 영향의 일종이 관여되었을 것이라는 생각을 아예 배제하긴 어;']렵다. 이러한 관점에서 본 연구에서 시간에 흐름에 따라 손가락 협응 지수와 정밀성 변동계수의 경향성이 바뀌는 것을 볼 때, 아마도 집중력의 저하라는 요인은 CNS가 움직임을 형성하는데 있어 시스템의 정밀성을 떨어트리는 것으로 사료된다.

하지만, 앞서 서술했듯 본 연구는 위의 주장을 뒷받침하기엔 다소 무리가 있다. 따라서, 후속 연구에선 집중력이라는 요인이 뇌의 활동에 어떠한 변화를 일으키는 지를 비교적 정확하게 측정할 수 있는 EEG나 fMRI등의 장비를 이용하여 좀 더 명확하게 집중력과 운동 수행의 관계성을 살펴보는 것이 필요하다 생각된다.

VI. 결론 및 제언

본 연구의 결과들을 종합해보면, 두 그룹 모두 시간이 지남에 따라 수행 변인과 협응 변인의 저하를 보였으며, DCD의 경우 수행 변인에서 통제집단에 비해 더 낮은 수준의 수행능력을 보였다. 시간이 지남에 따라 발생되는 수행능력과 협응 지수의 저하는 떨어지는 집중력의 영향에 의한 결과로 사료되며, DCD의 낮은 수준의 수행 능력은 선행 연구 결과들로써 알려진 바와 같이 DCD의 대표적인 행동 특성이 반영된 결과로써 해석된다. 또한 협응 지수에서 그룹 간의 통계적 차이가 나타나지 않은 것은 단순하고 반복적으로 힘을 생성하는 과제의 특성에 따른 천장효과(ceiling effect)에 의한 결과일 것으로 판단된다. 하지만 이를 전두엽 산소포화도 결과와 함께 생각해보면, DCD그룹은 통제집단과 비슷한 협응 능력을 나타내기 위해 더 많은 양의 산소를 필요로 한다 해석할 수 있다.

본 연구는 잘 연구되지 않았던 성인 DCD를 대상으로 기존에 DCD를 판별하기 위해 사용되었던 도구들에 비해 보다 정밀하고 정량적으로 비교가 가능한 방법으로 다중 손가락 협응을 관찰한 첫 연구이며, 건강한 성인과의 차이 및 시간의 흐름에 따른 부주의함의 영향을 정량적으로 밝히려했다는 것에 의의가 있다. 그러나, 본 연구에서 주어진 과제가 단순하고 반복적이어서 성인 DCD와 통제집단간 협응 지수에서의 통계적 차이를 확인할 수 없었으며(천장효과), 집중력을 요하는 장시간의 힘 생산 과제를 수행하는 동안 수행, 협응 지수와 전두엽 피질 산소포화도 간의 인과관계(causality)를 입증하는 데는 실패했다는 제한점을 가지고 있다.

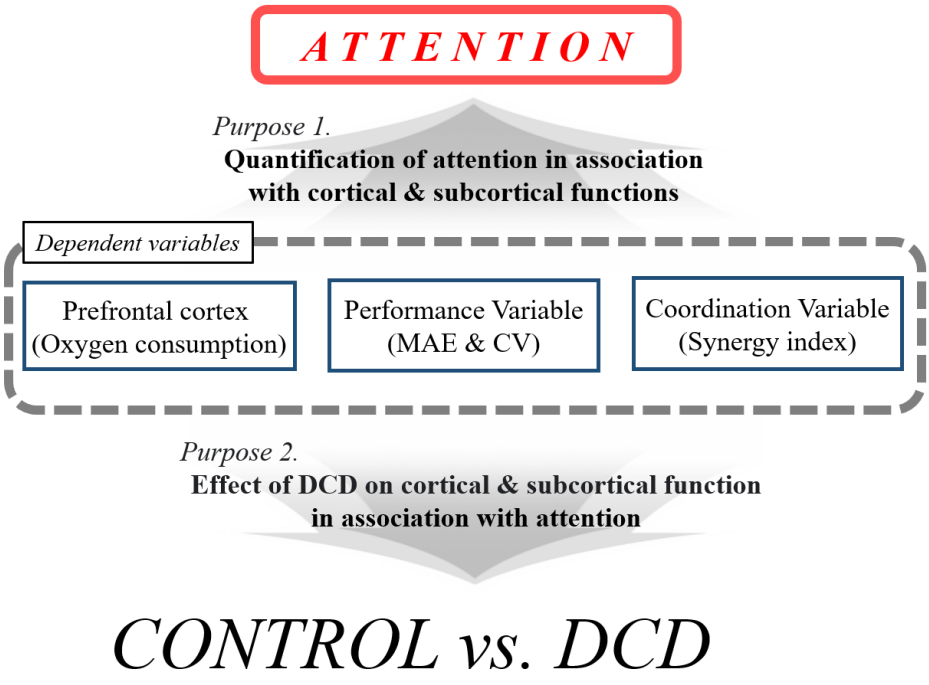


그림 38. 추후 연구 목적

따라서 향후 연구에서는 과제의 난이도를 높여 좀 더 협응 능력을 요구하는 과제로 설정할 필요가 있어 보이며, 부주의한 상태로 인해 협응력이 떨어지는 행동을 유도하는 과제를 통해 집중력의 요인에 대해 확인해야 할 것이 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

Ambike, S., Penedo, T., Kulkarni, A., Santinelli, F. B., & Barbieri, F. A. (2021). Step length synergy while crossing obstacles is weaker in patients with Parkinson's disease. Gait & posture, 84, 340–345.

Arthur, T., Harris, D. J., Allen, K., Naylor, C. E., Wood, G., Vine, S., Wilson, M. R., Tsaneva-Atanasova, K., & Buckingham, G. (2021). Visuo-motor attention during object interaction in children with developmental coordination disorder. Cortex; a journal devoted to the study of the nervous system and behavior, 138, 318–328.

Astle, D. E., Nobre, A. C., & Scerif, G. (2010). Subliminally presented and stored objects capture spatial attention. The Journal of neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience, 30(10), 3567–3571.

Beeman M, Friedman RB, Grafman J, Perez E, Diamond S, Lindsay MB. Summation priming and coarse semantic coding in the right hemisphere. J Cogn Neurosci. 1994 Winter;6(1):26-45.

Bernsteĭn, N. A. (1967). The co-ordination and regulation of movements.

Blank, R., Barnett, A. L., Cairney, J., Green, D., Kirby, A., Polatajko, H., ... & Vinçon, S. (2019). International clinical practice recommendations on the definition, diagnosis, assessment, intervention, and psychosocial aspects of developmental coordination disorder. Developmental Medicine & Child Neurology, 61(3), 242-285.

de Oliveira, R. F., & Wann, J. P. (2011). Driving skills of young adults with developmental coordination disorder: Regulating speed and coping with distraction. Research in developmental disabilities, 32(4), 1301-1308.

Delpy, D. T., Cope, M., van der Zee, P., Arridge, S., Wray, S., & Wyatt, J. S. (1988). Estimation of optical pathlength through tissue from direct time of flight measurement. Physics in Medicine & Biology, 33(12), 1433.

Diamond, A. (2000). Close interrelation of motor development and cognitive development and of the cerebellum and prefrontal cortex. Child development, 71(1), 44-56.

Dickinson, A., & Balleine, B. (1994). Motivational control of goal-directed action. Animal Learning & Behavior, 22(1), 1-18.

Duncan, J. (1986). Disorganisation of behaviour after frontal lobe damage. Cognitive neuropsychology, 3(3), 271-290.

Guo Z, Chen R, Zhang K, Pan Y, Wu J (2016) The Impairing Effect of Mental Fatigue on Visual Sustained Attention under Monotonous Multi-Object Visual Attention Task in Long Durations: An Event-Related Potential Based Study. PLOS ONE 11(9): e0163360.

Fuster, J. M. (2019). Single-unit studies of the prefrontal cortex. In The frontal lobes revisited (pp. 109-120). Psychology Press.

Harris, C. M., & Wolpert, D. M. (1998). Signal-dependent noise determines motor planning. Nature, 394(6695), 780-784.

Jo, H. J., Maenza, C., Good, D. C., Huang, X., Park, J., Sainburg, R. L., & Latash, M. (2016). Effects of unilateral stroke on multi-finger synergies and their feed-forward adjustments. Neuroscience, 319, 194-205.

Jo, H. J., Park, J., Lewis, M. M., Huang, X., & Latash, M. L. (2015). Prehension synergies and hand function in early-stage Parkinson's disease. Experimental brain research, 233(2), 425-440.

Kaplan, L., Chow, B. W., & Gu, C. (2020). Neuronal regulation of the blood–brain barrier and neurovascular coupling. Nature Reviews Neuroscience, 21(8), 416-432.

Karras, H. C., Morin, D. N., Gill, K., Izadi-Najafabadi, S., & Zwicker, J. G. (2019). Health-related quality of life of children with Developmental Coordination Disorder. Research in developmental disabilities, 84, 85-95.

Kew, J. J. M., Goldstein, L. H., Leigh, P. N., Abrahams, S., Cosgrave, N., Passingham, R. E., ... & Brooks, D. J. (1993). The relationship between abnormalities of cognitive function and cerebral activation in amyotrophic lateral sclerosis: a neuropsychological

and positron emission tomography study. Brain, 116(6), 1399-1423.

Knight, S. L., Padron, Y. N., & Waxman, H. C. (1985). The cognitive reading strategies of ESL students. Tesol Quarterly, 19(4), 789-792.

Latash, M. (Ed.). (2000). There is no motor redundancy in human movements. There is motor abundance. Motor control, 4(3), 259-261.

Latash, M. L., Ferreira, S. S., Wieczorek, S. A., & Duarte, M. (2003). Movement sway: changes in postural sway during voluntary shifts of the center of pressure. Experimental brain research, 150(3), 314-324.

Latash, M. L., Scholz, J. F., Danion, F., & Schöner, G. (2002). Finger coordination during discrete and oscillatory force production tasks. Experimental brain research, 146(4), 419-432.

Losse, A., Henderson, S. E., Elliman, D., Hall, D., Knight, E., & Jongmans, M. (1991). Clumsiness in children-do they grow out of it? A 10-year follow-up study. Developmental Medicine & Child Neurology, 33(1), 55-68.

Markowitz, D. A., Curtis, C. E., & Pesaran, B. (2015). Multiple component networks support working memory in prefrontal cortex. Proceedings of the National Academy of Sciences, 112(35), 11084-11089.

Miller, B. L., & Cummings, J. L. (Eds.). (2017). The human frontal lobes: Functions and disorders. Guilford Publications.

Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. Annual review of neuroscience, 24(1), 167-202.

Missiuna, C., Moll, S., Law, M., King, S., & King, G. (2006). Mysteries and mazes: Parents' experiences of children with developmental coordination disorder. Canadian Journal of Occupational Therapy, 73(1), 7-17.

World Health Organization. (1992). The ICD-10 classification of mental and behavioural disorders: clinical descriptions and diagnostic guidelines. World Health Organization.

Park, J., Lewis, M. M., Huang, X., & Latash, M. L. (2013). Effects of olivo-ponto-cerebellar atrophy (OPCA) on finger interaction and coordination. Clinical Neurophysiology, 124(5), 991-998.

Park, J., Wu, Y. H., Lewis, M. M., Huang, X., & Latash, M. L. (2012). Changes in multifinger interaction and coordination in Parkinson's disease. Journal of neurophysiology, 108(3), 915-924.

Piek, J. P., Dyck, M. J., Nieman, A., Anderson, M., Hay, D., Smith, L. M., ... & Hallmayer, J. (2004). The relationship between motor coordination, executive functioning and attention in school aged children. Archives of clinical Neuropsychology, 19(8), 1063-1076.

Polatajko, H. J., & Cantin, N. (2005, December). Developmental coordination disorder (dyspraxia): an overview of the state of the art. In Seminars in pediatric neurology (Vol. 12, No. 4, pp. 250-258). WB Saunders.

Regier, D. A., Kuhl, E. A., & Kupfer, D. J. (2013). The DSM-5: Classification and criteria changes. World psychiatry, 12(2), 92-98.

Reisman, D. S., & Scholz, J. P. (2003). Aspects of joint coordination are preserved during pointing in persons with post-stroke hemiparesis. Brain, 126(11), 2510-2527.

Rigoli, D., Piek, J. P., Kane, R., & Oosterlaan, J. (2012). An examination of the relationship between motor coordination and executive functions in adolescents. Developmental Medicine & Child Neurology, 54(11), 1025-1031.

Schall, J. D. (2002). The neural selection and control of saccades by the frontal eye field. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences, 357(1424), 1073-1082.

Scholz, J. P., & Schöner, G. (1999). The uncontrolled manifold concept: identifying control variables for a functional task. Experimental brain research, 126(3), 289-306.

Schweighauser, M., Shi, Y., Tarutani, A., Kametani, F., Murzin, A. G., Ghetti, B., ... & Goedert, M. (2020). Structures of α-synuclein filaments from multiple system atrophy. Nature, 585(7825),

464-469.

Shallice, T. I. M., & Burgess, P. W. (1991). Deficits in strategy application following frontal lobe damage in man. Brain, 114(2), 727-741.

SMITS-ENGELSMAN, B. C., Blank, R., VAN DER KAAY, A. C., MOSTERD-VAN DER MEIJS, R. I. A. N. N. E., VLUGT-VAN DEN BRAND, E. L. L. E. N., Polatajko, H. J., & Wilson, P. H. (2013). Efficacy of interventions to improve motor performance in children with developmental coordination disorder: a combined systematic review and meta-analysis. Developmental Medicine & Child Neurology, 55(3), 229-237.

Tal Saban, M., & Kirby, A. (2018). Adulthood in developmental coordination disorder (DCD): A review of current literature based on ICF perspective. Current Developmental Disorders Reports, 5(1), 9-17.

Saban, M. T., Ornoy, A., & Parush, S. (2014). Executive function and attention in young adults with and without Developmental Coordination Disorder–A comparative study. Research in developmental disabilities, 35(11), 2644-2650.

Treisman, A. M., & Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. Cognitive psychology, 12(1), 97-136.

Xu, D., Shin, N., Lee, S., & Park, J. (2021). Frequency-dependent effects on coordination and prefrontal hemodynamics during finger force production tasks. Frontiers in Human Neuroscience.

Yu, J. W., Lim, S. H., Kim, B., Kim, E., Kim, K., Park, S. K., ... & Choi, J. W. (2020). Prefrontal functional connectivity analysis of cognitive decline for early diagnosis of mild cognitive impairment: a functional near-infrared spectroscopy study. Biomedical optics express, 11(4), 1725-1741.

Zhao, M., Célérier, I., Bousquet, E., Jeanny, J. C., Jonet, L., Savoldelli, M., ... & Behar-Cohen, F. (2012). Mineralocorticoid receptor is involved in rat and human ocular chorioretinopathy. The Journal of clinical investigation, 122(7), 2672-2679.

Zwicker, J. G., Harris, S. R., & Klassen, A. F. (2013). Quality of life domains affected in children with developmental coordination

disorder: a systematic review. Child: care, health and development, 39(4), 562-580.

Abstract

Changes in multi-finger coordination and prefrontal oxygenation during prolonged cyclic force production in adults with Developmental Coordination Disorder

Jiho Kim
Department of Physical Education
The Graduate school
Seoul National University

The study aimed to explore multi-finger coordination and its relations to the features of prefrontal oxygenation in adults with developmental coordination disorder (A-DCD) during cyclic force production. Developmental coordination disorder (DCD) is a neurodevelopmental disorder characterized by deficits in motor skill acquisition and learning. DCD also causes a detrimental effect on academic achievement, possibly in conjunction with attention deficit. Recently, excessive activities of the lateral prefrontal cortex along with the decrement of eye-body coordination in DCD, were reported. Therefore, the motor coordination deficit in A-DCD may be associated with attention deficit. To identify A-DCD, we used the Adult Developmental Coordination Disorder/Dyspraxia Checklist (ADC) and Movement Assessment Battery for Children-2 (MABC-2). We identified fifteen A-DCD out of over 500 participants. The age- and gender-matched controls (CS, n=15) were also recruited. Subjects were asked to produce a smooth sine-wave total finger

force by pressing all four fingers while wearing the functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) device for the measurement of oxygen consumption on the prefrontal cortex. This force task required a decent level of attention to complete a given motor task successfully. The force templates were given on the computer screen, which consisted of a 180 s sinusoidal wave with 0.5 Hz frequency. All four fingers set the amplitude at 5% to 10% of maximal voluntary contraction (MVC) forces. The level of force was small enough not to induce muscle fatigue. Three trials were performed; thus, a total of 9-min data were acquired from a single subject. The MVC force of A-DCD was significantly lower than that of CS. 180 s of time-series data were divided into five phases, and all the variables were computed in each phase. Three groups of variables were computed: (1) coefficient of variation (CV) of peak force, (2) indices of multi-finger synergy in four-finger space, and (3) changes in oxyhemoglobin (ΔHbO). The CV values were increased over time, while stronger increment in A-DCD. The synergy indices decreased with phases (i.e., smaller synergy indices at phase 5 compared to phase 1), which was observed in both A-DCD and CS groups without group difference. ΔHbO remained unchanged from the first to last phase in the CS, while the U-shaped pattern of ΔHbO over phases was observed in A-DCD: high at phase 1 followed by dropped in the middle phases and increased at the end. Overall, the results of the current study failed to demonstrate the causality of coordination indices and prefrontal brain activities during long-durational force production tasks that may require performing the task in an 'attentive' manner. However, the long-durational task yielded a decrement in

coordination strength and performance accuracy over time, presumably in part due to inattentive status. Thus, future studies will have to ascertain the veracity of critical factors inducing less coordinative behaviors by inattentive status.

Keywords: developmental coordination disorder, cyclic force production, multi-finger coordination, synergy, UCM computation, prefrontal oxygenation

Student Number : 2021-28316