



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](#)

스포츠과학 석사학위 논문

수준별 테니스 선수의 포핸드
스트로크 시 손목 각도 변화에
대한 분석

2025년 2월

서울대학교 대학원
체육교육과 스포츠과학전공
WANG ZICEN

수준별 테니스 선수의 포핸드 스트로크 시 손목 각도 변화에 대한 분석

지도교수 문 효 열

이 논문을 스포츠학 석사학위 논문으로 제출함

2025년 2월

서울대학교 대학원
체육교육과 운동생화학전공
WANG ZICEN

WANG ZICEN의 석사학위 논문을 인준함

2025년 2월

위원장 _____ 송 욱 _____ (인)

부위원장 _____ 박 재 범 _____ (인)

위원 _____ 문 효 열 _____ (인)

국문초록

수준별 테니스 선수의 포핸드 스트로크 시 손목 각도 변화에 대한 분석

WANG ZICEN

서울대학교 대학원

체육교육과 운동생화학공

본 연구는 수준별 테니스 선수들이 포핸드 스트로크 과정에서 손목 각도 변화를 분석하고, 전완근 활성화도 및 기여도의 차이를 탐구하며, 손목 각도가 변화하는 시점에서 전완근 활성화도의 차이를 분석하는 것을 연구 목적으로 한다. 연구에서는 모션 캡처 시스템과 표면 근전도 기술을 결합하여 손목의 주요 세 가지 운동 방향(굴곡/신전, 요측/척측 편차, 내회전/외회전)에 초점을 맞췄다. PT(Pronator Teres), FCU(Flexor Carpi Ulnaris), FCR(Flexor Carpi Radialis), ECRB(Extensor Carpi Radialis Brevis) 및 SP(Supinator)가 주요 연구 대상 근육이다. 이러한 근육의 활성화도와 기여도를 정량적으로 분석함으로써, 수준별 테니스 선수들 간 차이를 평가하였다. 또한, 손목 각도 변화 시점과 근육 활성화도를 결합하여 상급 선수와 중급 선수 간의 근육 활성화 패턴에서의 세부적인 차이를 밝혀내고, 기술 수준과 운동 수행 간의 관계를 이해하는 데 새로운 관점을 제시하고자 한다.

본 연구는 ITN(International Tennis Number)에 따라 분류된 3 명의 상급 수준 선수와 3 명의 중급 수준 선수를 실험 대상으로 선정하였다. 실험 대상자에게 포핸드 스트로크 테스트는 각 5 회의 성공적인 스트로크를 완료하도록 요구하였으며, Optitrack 모션 캡처 시스템과 Delsys 표면 근전도 시스템을 사용하여 운동 데이터를 동기화하여 수집하였다. 또한, Visual 3D 소프트웨어를 통해 전완근 운동 모델을 구축하고 손목 관절 각도를 분석하였다. 본 실험은 서울대학교 윤리위원회(IRB No. 2409/004-003)의 승인을 받았다.

자료처리는 Window SPSS 27.0 통계 프로그램을 이용하였고, 본 연구의 통계적 유의수준은 $P \leq 0.05$ 로 설정하였다.

본 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

첫째, 상급 그룹은 굴곡/신전 방향에서의 활동 범위(ROM)는 중급 그룹보다 유의하게 작았으며, 중급 그룹은 요측/척측 방향에서의 활동 범위가 상급 그룹보다 유의하게 낮게 나타났다. 전반적으로 두 그룹의 손목 운동 패턴은 비슷한 활동 범위를 보였으나, 중급 그룹은 신전 및 외회전 방향에서 더 큰 활동 범위와 넓은 각도 변화 범위를 보여 더 높은 변이성을 나타냈다.

둘째, 활성화 분석에서 상급 그룹의 근육 활성화도가 더 빠르게 나타났으며, 특히 동작 주기의 30%~60% 구간에서 FCU와 ECRB가 보다 정교하게 활성화되었다. 반면, 중급 그룹은 활성화 시점이 상급 그룹에 비해 약간 지연되었고, SP의 활성화도도 40%~100% 구간에서 유의하게 증가하며, 활성화 패턴은 더 균일하게 나타났다. 전체 기여도 측면에서 상급 그룹은 FCU의 기여도가 더 높게 나타난 반면, 중급 그룹은 SP의 의존도가 더 높은 경향을 보였다. 순간 기여도 측면에서 포워드 스윙 단계에서 상급 그룹은 주로 ECRB와 SP의 기여도가 높게 나타난 반면, 중급 그룹은 PT의 기여도가 더 높게 나타났다. 이처럼 두 그룹 간 근육 기여도 패턴에서 유의한 차이가 나타났다.

셋째, 손목 각도가 신전에서 굴곡으로 전환되는 과정에서 중급 그룹의 FCR 활성화도는 상급 그룹의 활성화도보다 높았다. 반면 중급 그룹의 SP 활성화도는 상급 그룹보다 낮게 나타났다. 또한, 중급 그룹의 FCR 활성화도도 상급 그룹의

활성도보다 현저히 높게 나타났다.

최종적으로 본 연구는 상급 그룹과 중급 그룹의 손목 각도 변화와 근육 활성 차이에 대한 이해도를 높여, 코치들이 보다 효과적으로 훈련을 최적화하고 선수들의 운동 제어와 근육 협응 능력을 향상시켜 스트로크 퍼포먼스를 높이는 데 도움을 줄 수 있을 것으로 기대한다.

주요어 : 테니스 포핸드 스트로크, 손목 각도, 전완근, 활성도, 기여도

학 번 : 2022-24722

목 차

제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구의 필요성	1
제 2 절 연구 목적	4
제 3 절 가설	5
제 2 장 연구 배경	6
제 1 절 포핸드 스트로크 기술과 손목	6
1. 포핸드 스트로크의 라켓 그립 분석	6
2. 포핸드 스탠스 분석	6
3. 포핸드 스트로크 패턴 분석	7
제 2 절 포핸드 스트로크 단계 구분	7
1. 준비 단계(Preparation)	7
2. 포워드 스윙 단계(Acceleration)	8
3. 임팩트(Impact)	8
4. 팔로우 스루 스윙 단계(Follow-Through)	8
제 3 절 테니스 포핸드 스트로크의 생체역학적 특성(하지-상지-손목) 9	
1. 테니스 포핸드 스트로크 하지의 생체역학적 특징	9
2. 테니스 포핸드 스트로크 상지의 생체역학적 특징	9
3. 테니스 포핸드 스트로크 손목의 생체역학적 특징	9
제 4 절 테니스 스트로크 시 전완근의 생리학 연구	11
제 5 절 테니스에서의 표면 근전도 기술의 응용	12
제 6 절 테니스에서의 운동 포착 기술의 응용	13
제 7 절 Visual 3D 소프트웨어의 인체 모델 구축	14
제 3 장 재료 및 방법	15

제 1 절 연구 대상	15
1. 표본 규모	15
2. 실험 대상자의 상황	16
3. 실험 장소	17
제 2 절 연구 방법	18
1. 실험 기기	18
2. 실험 방안	18
제 3 절 신호 동기화	20
제 4 절 절 표면 근전도 신호의 수집	21
1. 장비 검사 및 준비	21
2. 근전도 센서와 측정할 근육	21
3. 실험 대상 준비	22
제 5 절 절 모션 캡처 시스템의 데이터 수집	22
1. 준비 과정	22
2. 마커의 설정	23
3. 실험 대상	24
제 6 절 절 동작 단계의 구분	26
제 7 절 절 통계 분석	27
1. 운동학적 데이터 처리 방법	27
2. 표면 근전도 데이터 처리 방법	27
3. 운동학 및 표면 근전도 데이터 계산 방법	27
4. 통계 방법	27
제 4 장 연구 결과	29
제 1 절 영상 수집 결과와 분석	29
1. 동작 시간	29
2. 상급-중급 그룹 손목 관절의 각도 변화 분석	30
제 2 절 절 표면 근전도 데이터 처리	38

1. 근육 활성화도	38
2. 근육 전체 기여도	43
3. 근육 순간 기여도	46
제 3 절 손목 각도 변화 시점에서의 근육 활성화도 차이	50
1. 신전-굴곡 변화 시점과 근육 활성화도	50
2. 외회전-내회전 변화 시점과 근육 활성화도	53
제 5 장 논의	57
제 6 장 결론 및 제언	61
제 1 절 결론	61
제 2 절 제언	62
참고문헌	63
Abstract	67

표 목 차

<표 1> 연구 대상 기본 정보	15
<표 2> 동작 시간 통계학적 검정 결과	29
<표 3> 손목 관절 활동도(deg)	30
<표 4> 상급 그룹 내 차이 통계학 검정 결과	30
<표 5> 중급 그룹 내 차이 통계학 검정 결과	31
<표 6> 손목 관절 활동도 통계학적 검정 결과	32
<표 7> 신전 및 외회전 활동도(deg)	36
<표 8> 신전 및 외회전 활동도 통계학적 검정 결과	36
<표 9> 상급 그룹과 중급 그룹 각각의 근육 활성화도 분포	39
<표 10> 상급 그룹과 중급 그룹 각각의 근육 전체 기여도	43
<표 11> 상급 그룹과 중급 그룹 각각의 근육 순간 기여도	47
<표 12> 신전/굴곡-활동도 통계학적 검정 결과	53
<표 13> 외회전/내회전-활동도 통계학적 검정 결과	56

그림 목 차

<그림 1> ITN 테스트 평가표	17
<그림 2> 실험 설계도	19
<그림 3> 실험 세팅 상태	20
<그림 4> 센서 마킹도	21
<그림 5> 마커 위치	24
<그림 6> 볼 머신 파라미터	25
<그림 7> 동작 단계 구분	26
<그림 8> 동작 시간 분포	29
<그림 9> 상급 그룹 각 실험 대상자의 손목 활동도	31
<그림 10> 중급 그룹 각 실험 대상자의 손목 활동도	32
<그림 11> 손목 굴곡/신전 각도	33
<그림 12> 손목 척추/요추 편차 각도	34
<그림 13> 손목 내회전/외회전 각도	35
<그림 14> 손목 신전 각도	37
<그림 15> 손목 외회전 각도	37
<그림 16> 상급 그룹 근육 활성화도 분포	40
<그림 17> 중급 그룹 근육 활성화도 분포	41
<그림 18> 상급 그룹 근육 전체 기여도	44
<그림 19> 중급 그룹 근육 전체 기여도	45
<그림 20> 상급 그룹 근육 순간 기여도	48
<그림 21> 중급 그룹 근육 순간 기여도	49
<그림 22> 상급 그룹 신전/굴곡-근육 활성화도	51
<그림 23> 중급 그룹 신전/굴곡-근육 활성화도	52
<그림 24> 상급 그룹 외회전/내회전-근육 활성화도	54
<그림 25> 중급 그룹 외회전/내회전-근육 활성화도	55

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 필요성

테니스 경기에서 포핸드 스트로크는 베이스라인 스트로크 기술의 핵심 기능일 뿐만 아니라 경기의 승패에 결정적인 역할을 한다(Pedro, 2023). 선행연구에 따르면 남녀 선수들은 경기 중 포핸드를 백핸드보다 25% 더 자주 사용하는 것으로 드러났다(Reid et al., 2016). 이는 경기력 향상을 위한 포핸드 기술 훈련의 필요함을 시사한다.

테니스에서 손목 관절은 공을 치는 데 중요한 역할을 하며, 운동 사슬의 종착점으로 에너지 전달에 중요한 역할을 한다(Stuelcken et al., 2017). 엘리트 테니스 선수들을 대상으로 한 실험에서는 스윙 속도가 증가할수록 손목 관절의 운동 범위도 비례하여 증가하는 것으로 나타났다(Seeley et al., 2016). 이러한 연구는 포핸드 스트로에서 손목 관절이 중요한 역할을 한다는 것을 보여준다.

또한, 과거 연구들은 손목 관절의 움직임과 관련된 다양한 측면을 다루고 있다. 다양한 스탠스에서 손목 관절 토크의 차이를 조사한 연구에 따르면, 스퀘어 스탠스(square stance)에서 손목 굴곡 피크 토크는 오픈 스탠스(open stance)보다 더 크게 나타났다(Bahamonde & Knudson, 2003). 포핸드로 그립을 잡는 위치에 따라 라켓의 헤드에 손목 속도가 영향을 받을 수 있다는 주장도 있다(Elliott, 2006). 또한, 손목 관절의 운동 패턴은 다양한 공의 회전 유형에 영향을 미친다는 연구 결과도 있다. 예를 들어, 플랫 스윙과 톱스핀을 할 때 손목 관절은 다양한 패턴(신전/굴곡, 외회전/내회전, 척골/요골 편차)에서 다양한 움직임을 보였다(Genevois et al., 2018). 이러한 연구들을 통해 손목 관절의 움직임에 관련된 요소들(자세, 라켓의 그립, 공의 회전 유형 등)을 어느 정도 이해할 수 있었으나, 여전히 현재 연구는 손목 관절 움직임의 동적 변화나 주요

순간에서의 손목의 각도에 대한 관심은 부족하며, 관련 부분에 대한 연구 또한 진행되지 않았다.

기술 발전에 따라 테니스 선수들은 정밀한 측정 도구들을 사용하게 되었고, 이는 테니스 선수들에 대한 연구를 더욱 세분화시켰다. 엘리트 선수의 손목 움직임 특성은 스트로크 시 손목이 약간 신전된 상태(10°)를 보였으며, 스트로크 후에는 더욱 신전되었다. 이와 비교해 중급 선수의 손목 움직임은 엘리트 선수와 유사하지만, 변화 폭이 더 작지만 최대 신전 각도(30°)로 나타났으며, 주로 손목 신근에 의존하여 힘을 생성하는 특징을 보였다. 초급자는 스트로크 전 손목 각도 변동이 크지만, 스트로크 시 손목이 일관된 신전 상태(30°)를 유지하며 스트로크 후에는 다른 그룹에 비해 신전 상태로의 변동 폭이 더 낮았다(Glynn et al., 2007). 이러한 결과는 손목 근육 활동이 손목의 굴곡 각도 변화와 일정한 상관관계가 있으며, 엘리트 선수들의 손목 동작이 더 안정적이고 정확하다는 것을 뒷받침하였다. 그러나 이 연구는 테니스 원핸드 백핸드 스트로크의 연구 결과로써, 테니스 선수가 스트로크를 할 때, 임팩트 전후의 손목 각도 변화와 근전도 활동의 상관관계에 대한 분석에 초점을 맞추었다. 이는 여전히 포핸드 스트로크에 대한 연구가 부족하다는 것을 시사한다.

한 연구에서는 고정밀 관성 측정 장치(IMU)를 이용하여 6명의 엘리트 테니스 선수들을 측정하고, 포핸드 스트로크 시 상지 관절(상완, 전완, 손목 포함)이 라켓 헤드의 속도 변화에 미치는 영향을 조사하였다. 연구 결과, 서로 다른 스트로크 방향에서 상지가 라켓 헤드 속도에 대한 기여도는 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다(Pedro et al., 2022). 또한, 한 연구에서는 테니스 선수들의 다양한 레벨을 대상으로 착용 가능한 기기(TRAM-2)를 이용하여 악력, 전완근의 움직임, 진동 자료 등 포핸드 스트로크 시 팔꿈치 힘줄 병증과 관련된 위험 요인을 평가하였다. 그 결과, 손목과 팔꿈치는 임팩트 충격 시 비슷한 충격 진동을 받을 수 있었고, 선수들의 수준에 따라 손목 움직임은 상이한 패턴을 보였고, 전완의 근육 움직임에도 차이가 있었다(Rigozzi et al., 2023). 다른 연구에서는 표

면 근전도 테스트를 이용하여 포핸드의 회전 레벨과 볼 속도에 따른 전완의 신근과 굴근의 차이를 평가하였다. 그 결과, 전완의 신근과 굴근 수준에서는 유의한 차이가 관찰되지 않았다(Rigozzi et al., 2022). 이러한 연구들은 모두 정밀한 측정 기구를 이용하여 수치의 정확성을 효과적으로 향상시켰다. 그러나 이 연구들은 단지 손목 각도와 전완근이 각각 다른 차이를 보일 수 있다는 것을 보여주었을 뿐, 손목 각도 변화의 시점과 전완근 운동 사이의 차이에 대한 자세한 연구는 없었다. 이에 따라, 필자는 테니스 선수의 스트로크 과정에서 손목 각도 변화 시점과 전완근 활동 간의 차이를 보다 심층적으로 연구하여, 포핸드 스트로크 시 생체 역학적 특성을 더 포괄적으로 이해할 필요가 있다고 주장하였다.

종합적으로, 현재 테니스 선수의 포핸드 스트로크 과정에서 상지 관절의 역학적 특성과 부상에 대해 여러 연구가 이루어졌지만, 대부분의 연구가 단일 수준의 테니스 선수 기술 측면에만 집중되어 있다. 테니스 선수들의 수준별 포핸드 스트로크 과정에서 손목 관절의 각도 변화에 대한 연구와 손목 각도 조절에 미치는 영향 요인에 대한 연구는 여전히 부족하다.

또한, 상지 관절 동역학에 관한 연구의 대부분은 어깨 관절과 팔꿈치 관절에 집중되고 있으며, 손목 관절에 대한 연구는 상대적으로 적다. 선행연구에 따르면, 다양한 포핸드 스트로크에서 손목의 각도가 볼의 회전 수준에 미치는 영향 또한 일부 존재하지만 전완근은 회전 수준에 따른 유의한 차이는 없었다(Rigozzi et al., 2022). 따라서 포핸드 스트로크 시 손목의 각도 변화 및 조절에 대한 추가 연구는 매우 필요하다. 포핸드 스트로크 과정에서 손목 각도의 변화를 심도 있게 분석하면, 서로 다른 수준의 테니스 선수들 간의 기술 차이를 더욱 잘 이해할 수 있을 것이다. 이러한 연구는 훈련 방법 최적화, 선수들의 기술 수준 향상 및 운동 손상 예방에 중요한 이론적 지원과 실천적 지침을 제공할 것이다.

제 2 절 연구 목적

본 연구는 생체역학적 관점에서 수준별 테니스 선수들이 포핸드 스트로크 동작을 수행할 때 손목 각도 변화, 전완근 활성화 및 기여도의 차이를 심층적으로 연구하고, 손목 각도가 변화하는 시점에서 전완근 활성화도 간의 차이를 분석하는 것을 목적으로 한다.

주요 목표는 다음과 같다.

첫째, 손목 각도 변화에 따른 차이를 평가할 것이다. 모션 캡처 시스템을 활용하여 수준별 테니스 선수들의 포핸드 스트로크 과정에서 손목 각도의 변화를 측정하고, 기술 수준이 손목 운동 제어에 미치는 영향을 양적으로 분석하고자 한다.

둘째, 전완근 활성화도에 따른 기여도 차이를 평가할 것이다. 표면 근전도 테스트를 통해 수준별 테니스 선수들이 포핸드 스트로크 과정에서 전완 각 근육의 활성화도와 기여도를 양적으로 분석하여, 기술 수준에 따른 전완근 활성화도와 기여도의 차이를 밝혀낼 것이다.

셋째, 손목 각도 변화 시점에서 전완근 활성화도에 따른 차이를 분석할 것이다. 손목 각도 변화 시점에서 수준별 테니스 선수들의 전완근 활성화도 차이를 비교 분석할 것이다.

상기 연구를 통해 테니스 포핸드 스트로크 기술의 생체역학적 특징을 보다 명확히 이해함으로써, 테니스 선수의 기술 훈련과 운동 손상 예방을 위한 과학적 근거를 제공하고, 궁극적으로 기술 수준 향상 및 운동 성능 최적화를 목표로 한다.

제 3 절 가설

본 연구는 기존 연구 및 초기관찰 결과를 기반으로 테니스 선수가 포핸드 스트로크 동작을 수행 시 나타나는 손목의 각도 변화와 관련된 가설을 설정하였으며, 구체적으로 다음과 같다.

첫째, 수준별 테니스 선수들이 포핸드 스트로크를 수행할 때 손목 각도의 변화에 따라 유의한 차이가 있을 것이다.

둘째, 수준별 테니스 선수들이 포핸드 스트로크를 수행할 때 전완근의 활성화도와 기여도에 따라 유의한 차이가 있을 것이다.

셋째, 수준별 테니스 선수들이 포핸드 스트로크를 수행할 때 손목 각도 변화 시점에 전완근 활성화도에 따른 유의한 차이가 있을 것이다.

이러한 가설은 테니스 선수들이 포핸드 스트로크 동작을 할 때 다양한 기술 수준에서 손목 각도 변화의 특성과 그 영향을 탐구하여, 후속 훈련을 위한 맞춤형 지도 및 기술 향상에 대한 이론적 지원을 제공하는 것을 목표로 한다.

제 2 장 연구 배경

제 1 절 포핸드 스트로크 기술과 손목

1. 포핸드 스트로크의 라켓 그립 분석

테니스 포핸드의 라켓 그립은 주로 컨티넨탈 그립, 이스턴 그립, 세미 웨스턴 그립, 웨스턴 그립으로 구분된다(Liu Wenyu, 2022; Tagliafico et al., 2009). 각 그립방식은 경기 패턴과 부상위험에 영향을 미친다. Tagliafico 등의 연구에 따르면, 그립 방식이 스트로크일 시 손목 손상에 영향을 미치며, 특히 세미웨스턴 그립과 웨스턴 그립은 손목 측면 손상과 높은 관련성을 보였다(Tagliafico et al., 2013). 따라서 그립 방식에 따라 경기력과 부상 위험이 달라질 수 있으며, 과학적인 훈련과 예방 조치가 중요하다.

2. 포핸드 스탠스 분석

포핸드 스트로크는 일반적으로 뉴트럴 스탠스, 세미 오픈 스탠스, 오픈 스탠스로 구분된다(Lambrich & Muehlbauer, 2023). 뉴트럴 스탠스는 균형 유지와 힘 전달에 유리하며, 세미 오픈 스탠스는 스트로크 각도를 빠르게 조정할 수 있도록 도움을 준다. 오픈 스탠스는 빠른 연습과 수비 전환에 적합하며(Johnson & Smith, 2018; Davis et al., 2019; Wang & Lee, 2020), 고속 경기에서 속도와 효율을 높이는 데 기여한다(Reid et al., 2013; Martin et al., 2021). 따라서 테니스 포핸드 스트로크의 스탠스 선택은 기술적 성과와 손목 부담에 큰 영향을 미친다.

3. 포핸드 스트로크 패턴 분석

테니스 포핸드는 크게 직팔 스윙과 굽팔 스윙으로 구분된다. 직팔 스윙은 손목의 회전 반경을 넓혀 라켓 헤드 속도를 증가시키지만, 손목에 부담을 줄 수 있다(Li & Liu, 2013; Liu Wenyu, 2022). 반면 굽팔 스윙은 손목의 자연스러운 움직임을 유도하여 압력을 줄이는 데 효과적이다. 이 두 가지 스트로크 방식과 손목의 관계를 이해하는 것은 스트로크 기술을 향상시키고 부상을 효과적으로 예방하는 데 필수적이다. 테니스 포핸드 스트로크에서 손목은 중요한 역할을 하며, 손목 사용을 최적화하면 스트로크 효율을 높이고 부상을 예방할 수 있다.

제 2 절 포핸드 스트로크 단계 구분

포핸드 스트로크는 크게 준비 단계, 포워드 스윙 단계, 임팩트 그리고 팔로우 스루 스윙 네 단계로 나뉜다. 준비 단계에서는 효율적인 스트로크의 기초를 다지고, 포워드 스윙에서는 임팩트를 통해 힘을 전달하며, 임팩트에서는 스트로크에서 가장 중요한 순간을 완성한다. 마지막으로, 팔로우 스루 스윙은 적절하게 동작을 마무리하는 단계로, 부상 예방에 효과적이다(Rigozzi et al., 2023).

1. 준비 단계(Preparation)

선수들은 라켓 그립, 스탠스, 백스윙 자세를 조정하여 스트로크를 준비한다. 연구에 따르면, 백스윙과 포워드 스윙의 연결이 스트로크 성능에 핵심적인 역할을 한다(Wilson, Elliott & Wood, 1991). 백스윙은 직선형과 곡선형으로 구분되며, 이는 선수의 기술 수준과 경기 상황에 따라 결정된다(Liu Wenyu, 2022).

2. 포워드 스윙 단계(Acceleration)

포워드 스윙 단계는 테니스 포핸드 스트로크에서 중요한 에너지 전달 과정으로, 신체를 회전시켜 힘을 라켓 헤드에 효과적으로 전달한다. 연구에 따르면, 상급 선수들은 어깨와 골반 속도 등 다양한 요소에서 우수한 성과를 보였으며, 이러한 지표들은 스트로크 성능에 큰 영향을 미친다 (Reid et al., 2013).

3. 임팩트(Impact)

임팩트는 스트로크에서 가장 중요한 순간으로, 그립, 위치, 각도조절을 통해 더 강력하고 정확한 타구를 만든다. 이를 통해 성능을 극대화하고 부상의 위험 역시 줄일 수 있다(Chadefaux et al., 2017; King et al., 2017; Ke, 2023).

4. 팔로우 스루 스윙 단계(Follow-Through)

팔로우 스루는 동작의 마지막 과정으로 팔의 내회전, 몸통의 회전, 힘의 조절을 통해서 연속성을 유지하고 힘을 전달한다(Morris et al., 1989). 몸통과 하체의 협력은 속도와 안정성을 증가시키며, 뛰어난 몸통 조절은 상체를 지탱하여 스트로크의 속도와 힘을 유지하는 데 도움이 된다(Elliot & Marshall, 2000). 팔로우 스루 스윙 단계의 질은 스트로크 각 연결 단계의 완성도에 따라 달라진다(Kovacs et al., 2007).

제 3 절 테니스 포핸드 스트로크의 생체역학적 특성(하지-상지-손목)

테니스는 하지와 상지, 손목의 운동으로 유기적인 움직임으로 이루어진 스포츠로, 이들 요소의 생체역학적 원리를 심도 있게 연구하면 경기력을 크게 향상시킬 수 있는 열쇠가 될 수 있다.

1. 테니스 포핸드 스트로크 하지의 생체역학적 특징

발목, 무릎, 고관절의 운동성은 부상 위험과 밀접한 연관이 있다. 연구에 따르면, 착지할 때 족저근막염, 종골골염과 같은 부상이 자주 발생할 수 있다(Sniteman & Suzuki, 2018; Fong et al., 2012). 또한, 오픈 스탠스에서 고관절에 가해지는 굴곡, 외전, 외회전은 부하를 크게 받으며, 이는 고관절 부상의 위험을 증가시킨다(Martin et al., 2020).

2. 테니스 포핸드 스트로크 상지의 생체역학적 특징

상지에서는 어깨 관절의 수평 굴곡, 전완 신전, 상완 내회전이 포핸드 스트로크의 스윙 속도와 힘을 주요 요인으로 작용한다. 연구에 따르면, 선수들이 스트로크를 할 때 각도가 작을수록 힘을 효과적으로 전달할 수 있어 유리한 것으로 나타났다. 또한, '테니스 엘보'(상완 외측 상과염)는 주로 손목 신근의 과부하로 인해 발생하며, 이러한 손상의 예방과 치료는 선수들의 경기력 향상에 중요한 요소로 여겨진다(Tian et al., 2024).

3. 테니스 포핸드 스트로크 손목의 생체역학적 특징

테니스에서 포핸드 스트로크 시 손목 관절은 키네틱 체인의 마지막 부

분으로 결정적인 역할을 한다(Stuelcken et al., 2017). 이는 마치 하나의 체인이 당겨질 때 체인 전체가 움직이며, 각 부분이 서로 영향을 미치는 것과 같다. 연구에 따르면, 라켓 속도의 약 25%는 손목의 굴곡과 척추 편차에서 발생하며(Elliott et al., 1997), 포핸드 스트로크 속도에 따라 손목의 굴곡 정도가 증가한 것으로 나타났다(Seeley et al., 2016). 이에 따라 손목 관절의 움직임이 포핸드 스트로크에서 중요한 역할을 수행한다는 것을 알 수 있다. 요약하자면, 손목 관절은 힘 전달의 핵심 노드이자, 운동 효율에 큰 영향을 미친다(Kovacs MS, 2003).

테니스 선수들의 손목 각도를 분석한 결과, 초보자들은 임팩트 순간 손목의 과도한 굴곡으로 상완 외측 상과염의 부상 위험이 높아진다(Elliott, 2006). 훈련 현장에서 선수와 코치는 스트로크 동작 시 손목과 전완근의 협력적 움직임을 중요한 요소로 인식해야 하며, 특히 스트로크의 정확도와 힘을 향상시키는 동시에 근육 피로와 손상의 위험을 최소화하는 데 주의를 기울여야 한다. 또한, 정기적인 생체역학적 분석을 통해 선수 개인에게 맞춤형 피드백이 가능하다는 것을 제안하고 있다(Yoann Blache et al., 2017).

이러한 분석 결과를 선수의 물리치료 및 재활 계획과 결합하면, 선수에게 보다 효과적인 치료와 지원을 제공하며, 궁극적으로는 기술 수준 향상을 도모할 수 있다. 이처럼 개별적인 분석을 통해 선수들의 경기력과 건강에 동시에 도움이 될 수 있을 것이다.

제 4 절 테니스 스트로크 시 전완근의 생리학 연구

전완근의 움직임은 스트로크의 강도와 정확도에 중요한 영향을 미친다. 연구에 따르면, 팔의 근육군, 특히 손목 굴근과 신근의 힘은 스윙할 때 스트로크의 강도와 방향에 핵심적인 역할을 한다(Miller et al., 2006; Sawali, 2018; Koronas & Koutlianos, 2021).

Koronas 등은 ECR의 활동 수준은 포핸드 스트로크에서의 공의 회전 유형(플랫, 탑스핀, 로브)과 공의 속도에 따라 크게 달라진다고 주장하였다(Koronas & Koutlianos, 2021). 또한, Ikenaga 등의 연구에서는 라켓이 중심을 벗어나 상단에서 스트로크 되는 경우, 손목 신근의 활동이 크게 증가하며, 이는 공의 발사 각도를 낮추고 스트로크 성공률에 영향을 미칠 수 있음을 발견하였다(Ikenaga et al., 2020). 마지막으로, Ke의 연구에서는 50명의 훈련 참가자들을 대상으로 훈련을 실시한 결과, 손목의 힘이 스트로크의 정확도에 영향을 미친다는 결과를 도출하였다(Ke, 2023).

선행연구에 따르면, 전완근의 활성화 패턴은 내회전과 외회전 동작에서 뚜렷한 차이를 보였다. 내회전 동작에서는 주로 FCR과 AMD에 의해 손목의 안정성이 제어된다. 반면, 외회전 동작에서는 ECR과 TBR이 팔꿈치의 굴곡과 신전에 큰 영향을 미친다(Chow et al., 2007). 특히, ECR은 관련 동작에서 충격을 완화하는 역할을 한다는 것이다.

기술 수준에 따른 근육 활성화 패턴에도 차이가 나타났다. 초보자는 근육 활성화 패턴이 단순하지만, 숙련된 선수의 경우에는 다양한 근육군을 조화롭게 활용해 일관된 힘과 정확도를 유지할 수 있다(Wang et al., 2021).

종합적으로, 전완근은 테니스 스트로크에서 매우 중요한 역할을 한다. 다양한 스트로크 방식, 라켓 그립, 훈련 강도는 모두 전완근의 활성화 패턴과 손목 제어 능력에 큰 영향을 미친다. 이는 향후 연구와 훈련에서 이 점에 주의를 기울여야 한다는 것을 시사한다.

제 5 절 테니스에서의 표면 근전도 기술의 응용

근전도는 근육의 전기신호를 기록 분석하는 기술로, 표면 근전도는 근육 활동 시 발생하는 전압 변화를 포착하는 방법이다(De Luca, 2002). 원시 근전도 신호는 주로 운동 단위의 모집 및 주파수 부호화에 영향을 받으며, 전극 아래의 근육 부위의 신경적 활성화를 반영한다. 피부 표면에 전극(예: Delsys Trigno Avanti 센서)을 부착하여 최대 2400Hz의 주파수로 근육 활동을 기록할 수 있다. 특성 추출에는 평균 진폭, 시간 영역(예: 적분 근전도), 주파수 영역(예: 전력 주파수 및 중위 주파수) 분석을 포함된다. 이러한 분석은 근육의 활성화 패턴 및 협응성을 평가하는데 효과적인 방법으로 사용된다(Vigotsky et al., 2018; Burchiel et al., 2018; Hug et al., 2018; Cappozzo et al., 2017).

테니스에서 근전도 기술은 포핸드 스트로크 과정 중 손목 및 상지 근육의 활동을 분석하는 데 널리 사용된다. 구체적으로 준비 단계에서는 근전도 수준이 낮고, 스윙 단계에서는 중간 수준의 활성화가 발생하며, 가속 단계에서는 특히 상지의 빠른 내회전에 의한 대흉근의 활동이 두드러져 근전도 수준이 현저히 증가한다(Ryu et al., 1988).

또한, Blackwell의 연구에 따르면, 전문 운동선수는 백핸드를 할 때 손목이 중립 자세를 유지하며 평균 0.41 rad(약 23°)의 신전이 있는 반면, 초보자는 0.22 rad(약 13°)의 굴곡을 보였다. 이처럼, 전문 운동선수는 스트로크 후 근전도 수준이 현저히 높으며, 이는 손목의 신전과 일치한다. 반면, 초보자의 경우 손목 신전근의 과도한 사용으로 부상이 발생할 수 있으며, 특히 상완 외측 상과염이 쉽게 생길 수 있음을 시사한다(Blackwell & Cole, 1994).

최근 기술의 발전으로 근육 활성화 패턴을 더욱 세밀하고 입체적으로 포착할 수 있게 되었다(Israel et al., 2023). 이러한 연구는 손목 및 상지 근육의 활성화 패턴과 이를 통한 경기력 최적화에 대한 이론적 기반을 마련하는 토대가 될 수 있다.

제 6 절 테니스에서의 운동 포착 기술의 응용

현재 손목의 운동학 측정은 주로 광전 모션 캡처 시스템을 사용하여 이루어지고 있으며, 이 시스템은 운동학 측정의 표준으로 널리 사용되고 있다(Guerra-Filho, 2005). 현대 테니스 경기에서는 스윙 속도가 빨라지고, 선수들마다 자신의 개성이 두드러지게 나타나고 있기 때문에, 전문 장비의 사용이 더욱 중요해지고 있다. 이러한 변화에 따라 모션 캡처 및 분석 시스템이 분석의 기술로 활용되고 있다(Zhang Qi, 2016).

선수의 손목 각도 변화를 분석함으로써 기술 수준과 동작 제어 능력을 깊이 이해할 수 있다. Israel의 연구는 10대의 카메라 모션 캡처 시스템을 사용하여 다양한 수준의 선수들 간의 손목 각도 변화를 비교하였고, 그 결과 기술 습득과 운동 효율에서 유의한 차이를 보여주었다(Israel et al., 2024). 이러한 결과는 운동 경기 분석에서 모션 캡처 기술의 중요성을 보여주며, 특히 선수의 손목 각도 변화와 기술 수준 간의 관계를 평가하는 데 있어 향후 연구에 새로운 방향을 제시한다.

제 7 절 Visual 3D 소프트웨어의 인체 모델 구축

Visual 3D 소프트웨어는 강력한 모션 캡처, 모델링 및 분석 도구로써 스포츠 과학 연구에서 널리 사용되고 있다. 이 방법은 높은 정밀도를 가지고 있어 선수들의 움직임을 실시간으로 파악할 수 있는 기능을 제공한다(Pedro, 2023).

연구자들은 인체 모델 구축 및 분석을 통해 운동선수의 동작에 따른 근육의 변화, 운동의 최적화에 큰 도움을 주고 있다.

또한, 연구자들은 전완근과 손목 동작의 생리학적 연구와 Visual 3D 소프트웨어의 응용을 결합함으로써 선수의 동작을 더욱 입체적으로 탐구할 수 있다. 이러한 다차원적인 접근 방식은 향후 연구에서 더욱 활발히 활용될 것으로 예상된다.

제 3 장 재료 및 방법

제 1 절 연구 대상

1. 표본 규모

본 연구에서는 상급 테니스 선수 5명과 중급 테니스 선수 5명을 모집하여 포핸드 스트로크 시 손목 각도와 전완근 활성도와 기여도를 비교하고자 하였다(Blackwell & Cole, 1994; Ikenaga et al., 2020). 그러나 데이터 품질 관리의 요구에 따라 최종적으로 3명의 상급 선수와 3명의 중급 선수 데이터만을 분석에 사용하였다. 이러한 선별 과정을 통해 데이터의 신뢰성을 보장하여 연구 결과의 신뢰성과 대표성을 더욱 높였다. 비록 표본 수가 줄어들었지만, 선택된 참여자들은 서로 다른 기술 수준의 선수들의 활동 차이를 효과적으로 반영할 수 있었다. 특히 Blackwell과 Cole, Ikenaga의 연구에서도 작은 표본 크기를 사용하였으며, 이는 샘플 선택과 데이터 분석에서 품질 관리의 중요성을 강조하였다(Blackwell & Cole, 1994; Ikenaga et al., 2020).

<표 1> 연구 대상 기본 정보

변수	상급 그룹	중급 그룹	Z	P
나이	25(25,28)	28(24,31)	-0.449	0.653
키	180(180,183)	181(169,186)	-0.221	0.825
몸무게	80(78,87.5)	80(80,94)	-0.696	0.487
훈련연한	9(4,11)	3(2,5)	-1.528	0.127

상급 그룹과 중급 그룹의 나이, 키, 몸무게, 훈련연한에서의 차이는 통

계적으로 유의하지 않았다($p>0.05$). 이는 이러한 기본 변수가 두 그룹 간에 유사하게 분포하고 있음을 나타냈다. 그 중, 상급 그룹의 훈련연한이 더 길게 나타났으나 그 차이는 통계적으로 유의한 수준에 이르지 않았다.

2. 실험 대상자의 상황

본 실험에 자발적으로 참여할 다양한 수준의 남성 테니스 선수를 모집하였으며, 선수의 경기 수준을 나타내는 ITN(International Tennis Number) 등급에 따라 분류하였다. 실험 대상자들은 모두 자신이 평타를 성공적으로 칠 수 있다고 믿었다.

ITN 등급 분류에 따라 포핸드를 상급 2~4급과 중급 5~7급으로 구분하여 선수들을 선별하였다. 상급 2~4급 선수들은 포핸드에서 강한 공격력과 정확성을 보이며 다양한 타법을 활용할 수 있다. 스트로크의 깊이와 힘이 균형을 이루어 결정적인 샷을 자주 성공시키고 상대방에게 실수를 유도할 수 있다. 중급 5~7급 선수들은 포핸드에서 기본적인 안정성을 갖추고 스트로크의 방향과 깊이를 조절할 수 있지만, 변화와 힘이 부족하다. 비록 가끔 효과적인 포핸드를 칠 수 있지만 스트로크의 일관성과 제어력 향상이 필요하다.

International Tennis Number — On Court Assessment

Name: _____ Date of Birth: _____ Sex: M F
 Assessor: _____ Date: _____ Venue: _____

what's your number?



International Tennis Number

GS Depth			Volley Depth			GS Accuracy			Serve		
Stroke	#	Score	Stroke	#	Score	Stroke	#	Score	Stroke	#	Score
Forehand	1		Forehand	1		Forehand DL	1		1st Box Wide	1	
Backhand	2		Backhand	2		Backhand DL	2		1st Box Wide	2	
Forehand	3		Forehand	3		Forehand DL	3		1st Box Wide	3	
Backhand	4		Backhand	4		Backhand DL	4		1st Box Middle	4	
Forehand	5		Forehand	5		Forehand DL	5		1st Box Middle	5	
Backhand	6		Backhand	6		Backhand DL	6		1st Box Middle	6	
Forehand	7		Forehand	7		Forehand CC	7		2nd Box Middle	7	
Backhand	8		Backhand	8		Backhand CC	8		2nd Box Middle	8	
Forehand	9		Sub Total			Forehand CC	9		2nd Box Middle	9	
Backhand	10	Backhand CC				10		2nd Box Middle	10		
Sub Total			Volley Depth Total			Forehand CC	11		2nd Box Wide	11	
Consistency						Backhand CC	12		2nd Box Wide	12	
GS Depth Total						Sub Total			Sub Total		
						Consistency			Consistency		
GS Accuracy Total						Serve Total			Serve Total		

This ITN Assessment was conducted in accordance with the guidelines set forth in the Official ITN Assessment Guide. I hereby agree to its authenticity.

Signed by/belief of the player: _____

Signed by the Assessor: _____

Strokes Total	Mobility Score	Total Score

Mobility Table	Time	Score

T	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15
S	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	12	14	15	16	18	19	21	26	32	39	45	52	61	76
Score (F)	57-79	80-108	109-140	141-171	172-205	206-230	231-258	259-303	304-344	345-430																
Score (M)	75-104	105-139	140-175	176-209	210-244	245-268	269-293	294-337	338-362	363-430																
ITN	ITN 10	ITN 9	ITN 8	ITN 7	ITN 6	ITN 5	ITN 4	ITN 3	ITN 2	ITN 1																

Number of Assessments	New ITN Rating

Circle players ITN level after completing the Assessment.

<그림 1> ITN 테스트 평가표

3. 실험 장소

모든 실험은 서울대학교 테니스장과 체육관에서 실시하였다.

제 2 절 연구 방법

1. 실험 기기

- (1) 표면 근전도 장비(Delsys), 센서 5개
- (2) 모션 캡처 시스템(Optitrack), 카메라 5개
- (3) 동기 신호 장치 1대
- (4) 속도 측정기
- (5) 볼 머신 1대
- (6) 테니스 공, 테니스 라켓
- (7) 마킹 테이프
- (8) 알코올, 밴드
- (9) International Tennis Number(선수의 등급을 구분하는데 사용되며, 세 번의 평균 점수를 통해 등급을 판단함)
http://www.sportsby5.sg/img/programs/itn/IO_3500_original.pdf

2. 실험 방안

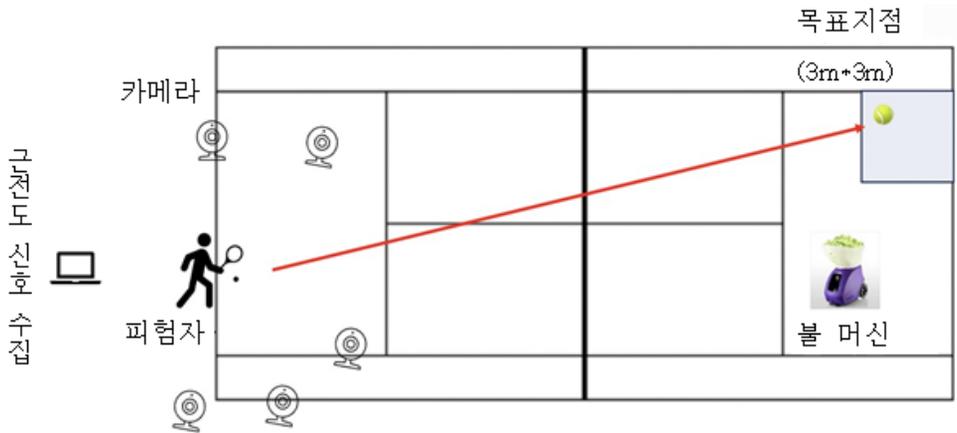
(1) 준비 운동

모든 실험 대상자는 충분한 준비 운동을 실시한 후에 실험을 진행하였다. 실험 데이터의 정확성을 높이기 위해, 실험 대상자는 반사점이 없는 운동복과 운동화를 착용해야 하며, 테스트 중에는 시계, 목걸이, 스포츠 팔찌 등 불필요한 장식품을 착용하지 않아야 한다.

(2) 테스트 프로세스

준비 운동이 끝난 후, 실험 대상자는 테스트 환경, 공의 속도 및 궤적에 적응하기 위해 5~10회의 포핸드 스트로크 연습을 진행해야 한다. 데

이터 수집이 시작되기 전에 실험 대상자는 모션 캡처 영역의 중앙에 서서 중립 위치를 확보하기 위해 해부학적 표준 자세로 볼 머신을 정면으로 바라보아야 한다. 테스트에서는 실험 대상자가 5회의 성공적인 스트로크를 완료해야 하며, 성공 기준은 모든 관련 센서가 성공적으로 기록하고 스트로크가 설정된 목표 영역(테니스 코트 반대편 3m*3m 대각선 위치)에 떨어질 때만 해당된다. 또한, 실험자와 피험자가 모두 이번 스트로크가 효율적이라고 판단할 경우에만 해당 데이터를 보존할 수 있다. 만약 공이 유효 영역에 떨어지지 않거나 실험자나 피험자 중 어느 한 쪽이 스트로크가 비효율적이라고 판단하면 해당 데이터는 삭제된다.



<그림 2> 실험 설계도



<그림 3> 실험 세팅 상태

제 3 절 신호 동기화

본 연구에서는 모션 캡처 시스템과 근전도 테스트 시스템을 동시에 운영하여 상응하는 데이터를 동시에 획득하였다. 분석 과정에서 모션 캡처 신호와 근전도 신호의 시간 동기화를 보장하기 위해, 본 연구에서는 외부 동기화 방법을 사용하였다. 동기화 신호 방출기를 카메라와 표면 근전도 신호 수신기에 연결하였다. 동기화 신호 방출기가 활성화되면, 표면 근전도 신호 수신기는 사전 촉발 상태에서 사인 전압 신호를 수신하였다. 동시에 카메라도 작동하여 모션 캡처 신호와 표면 근전도 신호의 데이터 동기 수집이 완료되었다.

제 4 절 표면 근전도 신호의 수집

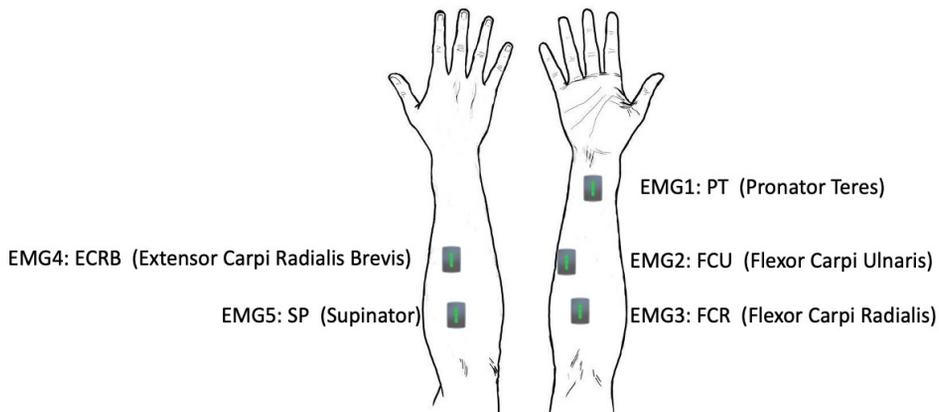
1. 장비 검사 및 준비

Trigno Avanti 센서의 전원이 충분한지 확인하였고, 센서와 수신기 간의 연결이 원활한지 점검하였다. 수신기를 컴퓨터에 연결하였고 근전도 works 소프트웨어에서 연결이 성공적으로 이루어졌는지 확인하였다. 샘플 데이터 설정은 다음과 같다.

2. 근전도 센서와 측정할 근육

실험 설계에 따라 측정해야 할 근육을 아래의 5가지로 정하였다.

- EMG1: PT(Pronator Teres)
- EMG2: FCU(Flexor Carpi Ulnaris)
- EMG3: FCR(Flexor Carpi Radialis)
- EMG4: ECRB(Extensor Carpi Radialis Brevis)
- EMG5: SP(Supinator)



<그림 4> 센서 마킹도

3. 실험 대상 준비

피부를 청결히 하기 위해, 알코올 솜을 사용하여 테스트 대상자의 목표 근육 부위를 닦아 피부 표면의 기름기와 땀을 제거하여 피부 저항을 낮추고 근전도 신호의 안정성과 선명도를 확보하였다. Trigno Avanti 센서를 목표 근육의 중복부에 정확하게 부착하며, 센서는 근섬유 방향을 따라 부착하여 최적의 근육 활동 신호를 포착하였다. 관절이나 뼈 돌기 근처에 부착하지 않도록 주의하여 신호 간섭을 방지하였다. 센서가 움직이는 동안 위치가 변하지 않도록 근육 테이프를 사용하여 센서를 단단히 고정하고, 자연스러운 동작을 과도하게 제한하지 않도록 하였다.

제 5 절 모션 캡처 시스템의 데이터 수집

실험에서는 OptiTrack 모션 캡처 시스템을 사용하여 실험 대상의 포핸드 스트로크 과정 중 운동 궤적, 특히 손목의 동작을 정밀하게 기록하였다. 사용 절차는 다음과 같다.

1. 준비 과정

(1) 하드웨어 설비의 설치

카메라 레이아웃: 실험 장소 주변에 5대의 카메라를 배치하여, 피험자 주위로 서라운드 레이아웃을 형성하였다. 이 카메라는 피험자의 모든 동작을 효과적으로 촬영하여 카메라 시야각이 가려져 발생하는 데이터 손실을 최소화하였다.

카메라 연결 및 전원 공급: 카메라를 마스터 컴퓨터에 연결하여 모든 카메라가 호스트 컴퓨터와 동기화되도록 하였다.

카메라 보정: 시스템에서 제공하는 보정 도구(반사구가 부착된 보정

막대)를 사용하여 실험 공간에서 소프트웨어의 안내에 따라 다양한 각도로 보정 도구를 움직였다. 이를 통해 모든 카메라의 시야각과 데이터 스트림이 일치하도록 하였다. 실험 공간의 3차원 좌표계를 생성하여 포착된 마커의 위치가 동일한 좌표계 내에서 정확하게 반영되도록 하였다. 좌표계의 모든 좌표점은 5대의 모션 캡처 카메라의 촬영 범위 내에 있어야 하며, 이 과정에서 3차원 보정 프레임은 움직이지 않도록 하였다.

(2) 소프트웨어 구성

OptiTrack의 Motive 소프트웨어를 시작하였고 모든 카메라가 올바르게 연결되고 보정되었는지 확인하였다. 샘플링 속도는 200Hz(초당 200개의 데이터 포인트 캡처)로 설정하였으며, 카메라 해상도와 시스템 동기화 설정을 완료하였다.

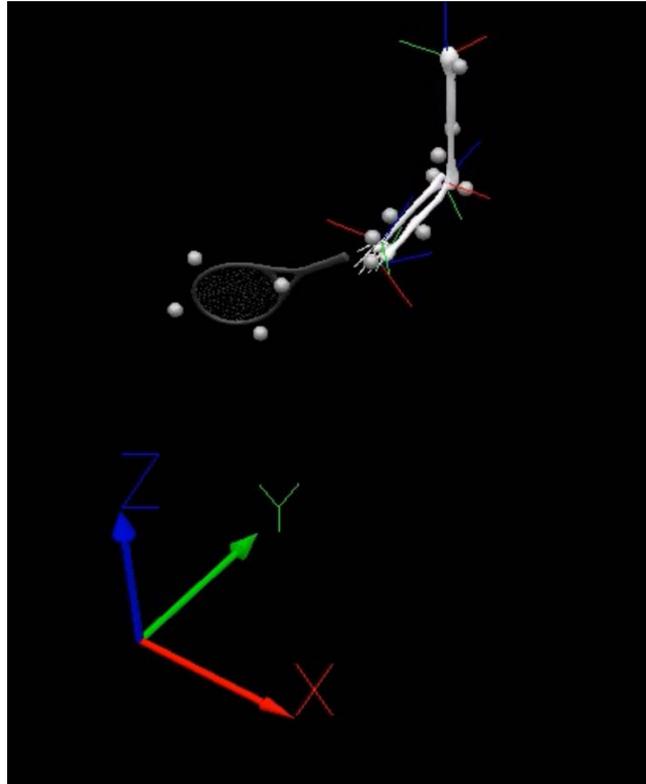
2. 마커의 설정

(1) 마커 위치 확정

신체 마커: 10개의 반사 마커를 실험 대상자의 팔에 부착하였다. 이 마커는 손목, 전완, 상팔의 주요 위치에 부착되었다.

라켓 마커: 라켓에 4개의 반사 마커를 부착하였다. 이 마커는 라켓의 3차원 공간에서의 운동 궤적을 실시간으로 기록하고, 실험 대상의 팔에 부착된 마커의 기록과 종합적으로 분석되었다.

마커는 실험 대상자의 주요 부위에 단단히 부착되어, 쉽게 떨어지거나 실험 대상자의 동작으로 인해 다른 곳으로 이동되지 않도록 하였다. 모든 마커는 명확히 보이는 위치에 부착되어야 하며, 의복이나 운동 기구에 가려지지 않도록 주의하였다.



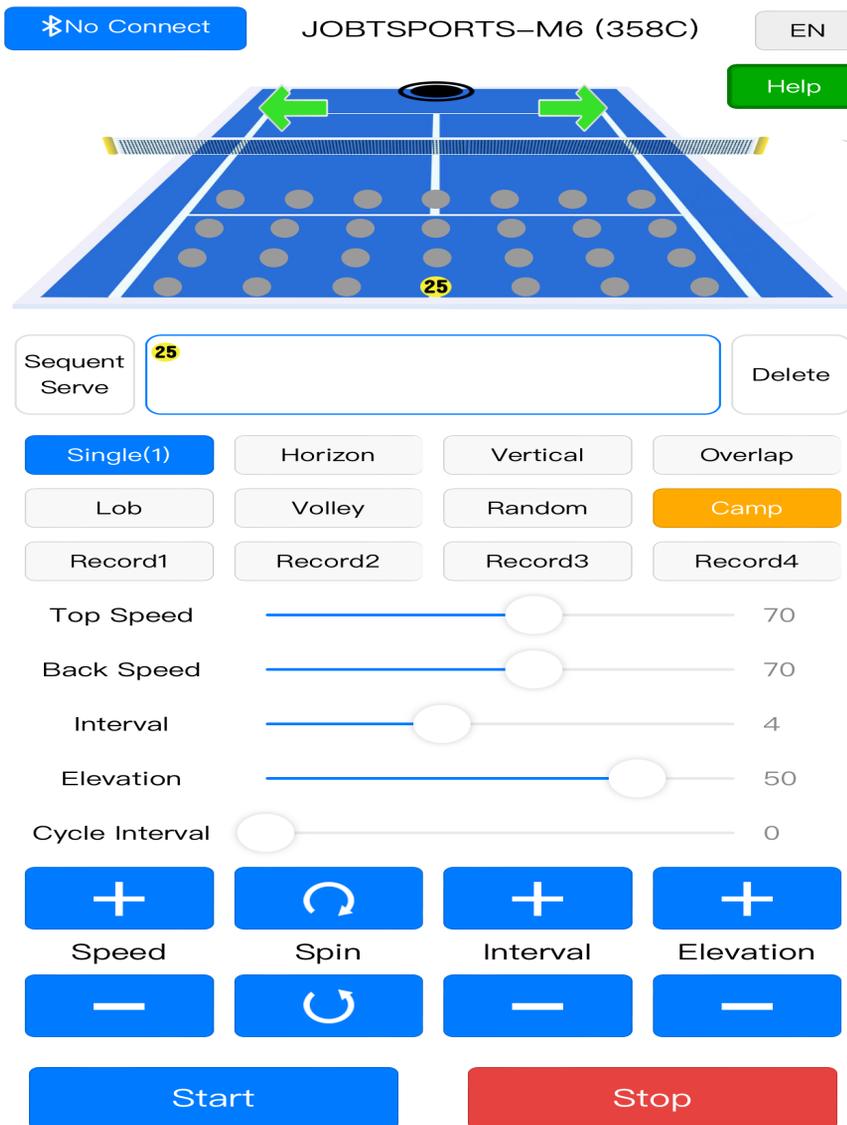
<그림 5> 마커 위치

3. 실험 대상

실험 대상자가 민소매 운동복을 입거나 상반신이 노출되어 반사 마커가 가려지지 않도록 실험 대상자의 의상을 촬영 전에 확인하였다. 이후, 라켓을 잡고 있는 팔의 주요 해부학적 위치(손목, 전완, 팔꿈치, 상팔)에 반사 마커를 부착하였다. 각 마커가 단단히 부착되고 명확히 보이도록 하며, 운동 중에 떨어지거나 가려지지 않도록 주의하였다.

실험 대상자는 3차원 프레임의 정의된 영역 내로 들어가 포핸드 스트로크 실험을 준비하였다. 스트로크 기술을 수행할 때, 볼 머신을 사용하여 일정한 궤도로 공을 공급하며, 공의 높이와 낙하점을 일치시켜 실험

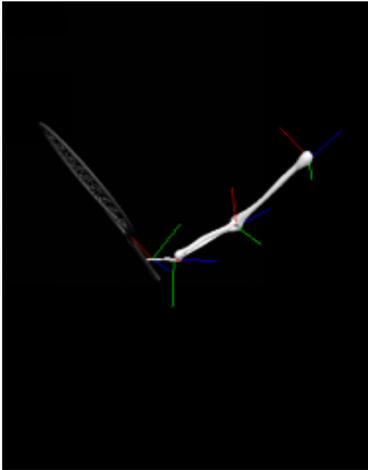
조건의 제어성과 반복성을 확보하였다. 또한, 매 스트로크 사이에 4초의 간격을 두며, 실험 대상자는 5회의 성공적인 스트로크를 완료해야 하였다. 각 스트로크 데이터는 저장되어 후속 데이터 분석의 기초로 활용되었다. 촬영이 끝난 후, 실험 대상자는 3차원 측정 영역에서 퇴장하였다.



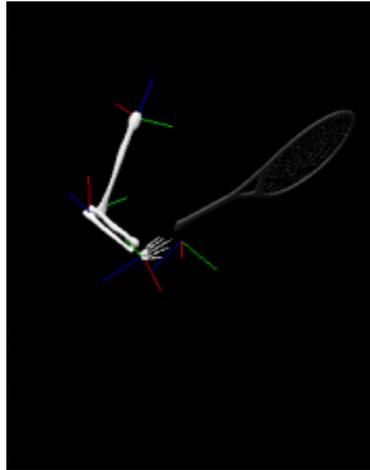
<그림 6> 볼 머신 파라미터

제 6 절 동작 단계의 구분

테니스의 포핸드 스트로크는 복잡한 다관절 협동 운동으로 신체의 여러 관절이 함께 움직여야만 완성할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 라켓과 테니스공이 접촉한 뒤 분리되기까지 실험 장비의 제한성으로 인해 라켓과 공이 변화하는 특징을 포착하지 못하였다. 이에 테니스 포핸드 스트로크의 기술 동작을 더욱 정확하게 분석하기 위해 전체 스트로크 과정을 여러 단계로 나누었다. 또한, 개체가 동작의 시작부터 포워드 스윙까지 받는 차이를 줄이기 위하여 그림 7과 같이 포워드 스윙부터 시작하여 팔로우 스루 스윙 끝날 때까지 단계를 연결하였다.



포워드 스윙



팔로우 스루 스윙

<그림 7> 동작 단계 구분

제 7 절 통계 분석

1. 운동학적 데이터 처리 방법

Motive 3.5를 통해 운동학적 데이터를 .C3D 형식으로 내보낸 후, QTM2022(Qualisys Track Manager, QTM)를 사용하여 .C3D 파일의 운동학적 데이터를 읽었다. 원시 운동학적 데이터는 다항식(Polynomial), 관계(Relational), 가상(Virtual) 방법을 통해 마크 점 궤적의 누락된 부분을 보수하고, 6Hz의 4차 버터워스 로우 패스 필터를 적용한 후, 처리된 데이터를 .C3D 형식으로 저장하였다.

2. 표면 근전도 데이터 처리 방법

원시 근전도 데이터는 Matlab R2017a를 사용하여 마감 주파수가 50~350Hz인 대역 통과 필터를 적용하였다. 이후 정류, 평활 및 피크 표준화 처리를 진행하여 최종적으로 .Mat 형식으로 저장하였다.

3. 운동학 및 표면 근전도 데이터 계산 방법

Visual3D V6을 사용하여 .C3D 파일의 운동학적 데이터를 읽고, 강제 모델을 구축한 후, 'Import_Data_From_Matfile' 명령을 통해 근전도 데이터를 가져와 운동학 데이터와 통합하였다. 마지막으로, 동작 단계를 구분하고 운동학 및 표면 근전도 신호의 특성값을 계산하였다.

4. 통계 방법

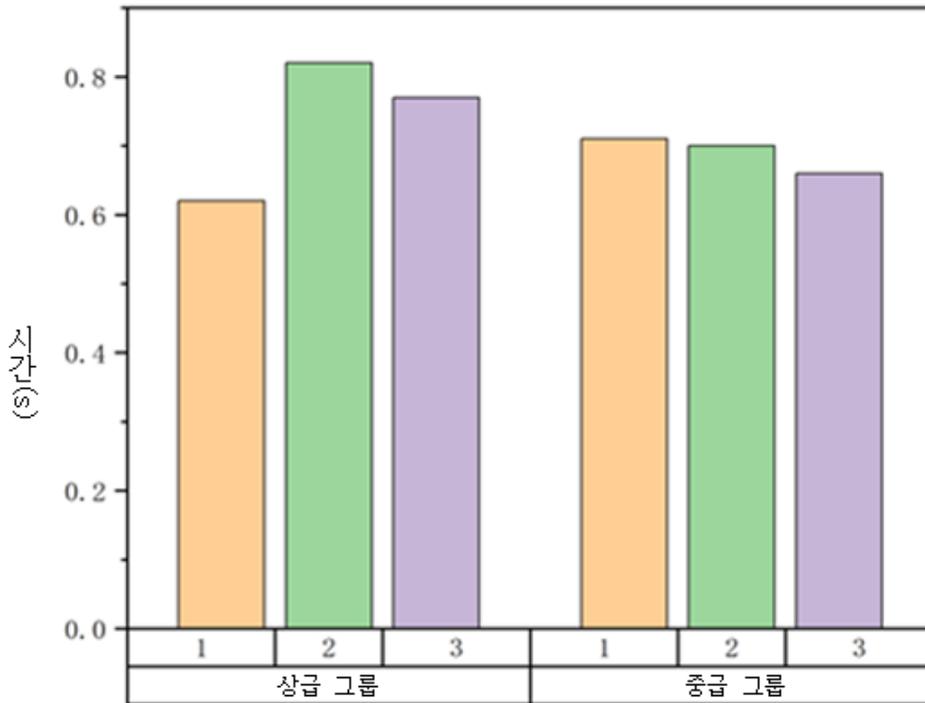
본 연구는 상급과 중급 선수들의 손목 각도 변화 및 전완근 활성도와

기여도에서 차이를 비교 분석하는데 목적이 있다. 데이터 처리 과정에서 Kruskal-Wallis H 검정을 통해 그룹 내 차이를 비교하며, H값과 P값으로 그룹 내 차이의 유의성을 판단한다. H값은 통계량을 검증하기 위한 것이며, P값은 차이의 유의성을 평가하는 데 사용된다($p \leq 0.05$ 는 유의한 차이를 나타낸다). 또한, Mann-Whitney U 검증을 이용하여 그룹 간 차이의 유의성을 분석하며, Z값과 P값으로 그룹 간 차이의 유의성을 판단하였다. Z값은 통계량을 검증하기 위한 것이며, P값은 차이의 유의성을 판단하는 데 사용된다($p \leq 0.05$ 는 유의한 차이를 나타낸다).

제 4 장 연구 결과

제 1 절 영상 수집 결과와 분석

1. 동작 시간



<그림 8> 동작 시간 분포

<표 2> 동작 시간 통계학적 검정 결과

변수	상급 그룹	중급 그룹	Z	P
시간	0.77 (0.62,0.82)	0.70 (0.66,0.71)	-0.635	0.513

상급 그룹의 실험 대상자 3명의 각기 다른 스트로크 동작 시간은 0.62, 0.77, 0.82초였으며, 중급 그룹의 스트로크 동작 시간은 0.66, 0.70, 0.71초로 나타났다. Z 검정 결과 Z값은 -0.635, P값은 0.513으로 나타났다. 이는 상급 그룹과 중급 그룹 사이에 동작 시간의 통계학적 유의한 차이가 없음을 시사하며, 두 그룹 선수들이 이 동작을 실행할 때 나타나는 시간이 유사성이 있음을 보여준다.

2. 상급-중급 그룹 손목 관절의 각도 변화 분석

<표 3> 손목 관절 활동도(deg)

방향	상급 그룹	중급 그룹
굴곡/신전	45.96±4.39	63.77±6.24
요골/척추 편차	44.87±6.50	23.72±8.67
내회전/외회전	56.25±6.22	55.67±11.60

(1) 그룹 내 차이 분석

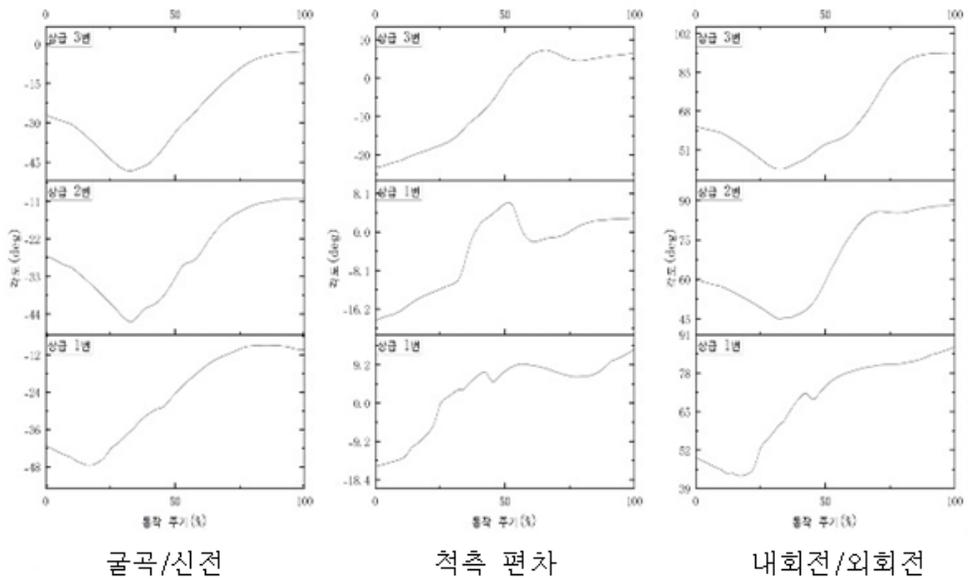
<표 4>와 <표 5>에서 볼 수 있듯이, 상급 그룹과 중급 그룹의 손목은 굴곡/신전, 요골/척추 편차, 그리고 내회전/외회전 방향에서 유의한 차이가 없었다. 이는 상급 그룹과 중급 그룹의 실험 대상자가 굴곡/신전, 요골/척추 편차, 내회전/외회전 방향에서 상대적으로 일관됨을 의미한다.

<표 4> 상급 그룹 내 차이 통계학 검정 결과

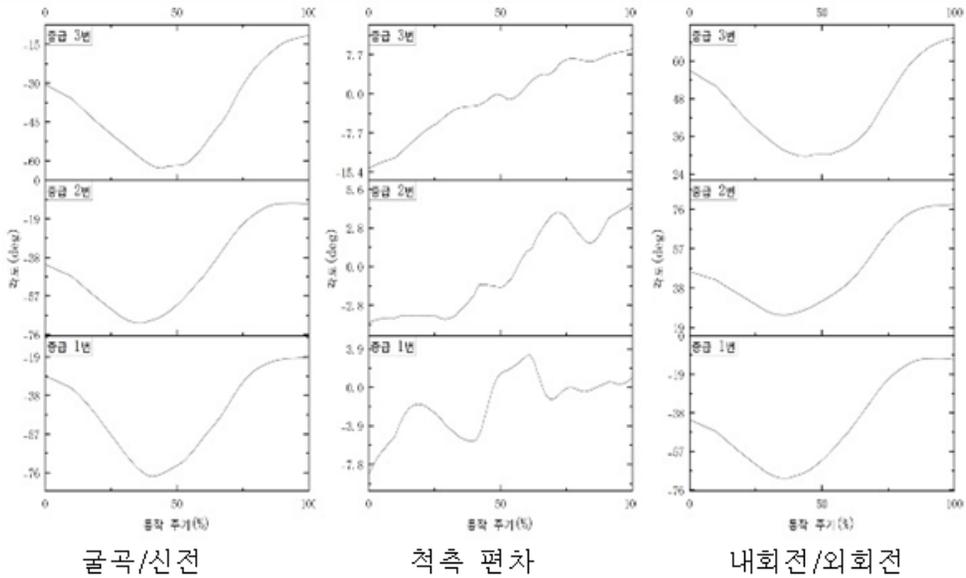
변수	상급 그룹	H	P
굴곡/신전	44.51(42.48, 50.90)	2.000	0.368
요골/척추 편차	47.33(37.50, 49.77)	2.000	0.368
내회전/외회전	58.90(49.15, 60.71)	2.000	0.368

<표 5> 중급 그룹 내 차이 통계학 검정 결과

변수	중급 그룹	H	P
굴곡/신전	66.10(56.62, 68.10)	2.000	0.368
요골/척골 편차	26.87(13.90, 30.40)	2.000	0.368
내회전/외회전	59.70(42.58, 64.70)	2.000	0.368



<그림 9> 상급 그룹 각 실험 대상자의 손목 활동도



<그림 10> 중급 그룹 각 실험 대상자의 손목 활동도

손목 관절의 다양한 방향에서의 각도 변화를 분석하였을 때, 시간과 시작 각도의 정규화 처리를 통해 개인차의 영향을 제거하였고, 수준별 비교를 용이하게 하였다.

<표 6> 손목 관절 활동도 통계학적 검정 결과

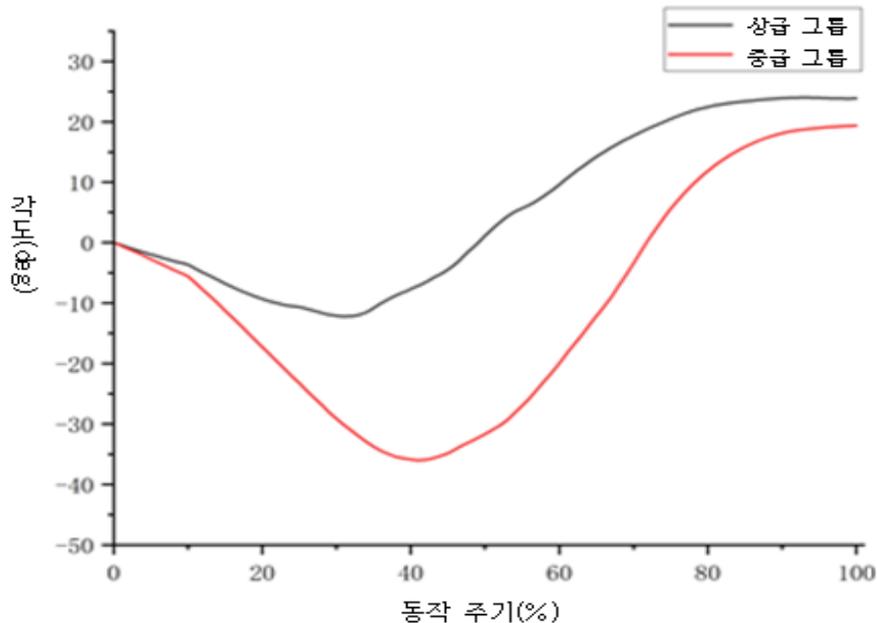
변수	상급 그룹	중급 그룹	Z	P
굴곡/신전	44.51 (42.48,50.90)	66.60 (56.62,68.10)	-1.964	0.05
요골/척골 편차	47.33 (37.50,49.77)	26.87 (13.90,30.40)	-1.964	0.05
내회전/외회 전	58.90 (49.15,60.71)	59.70 (42.58,64.70)	-0.218	0.827

*P ≤ 0.05

(2) 그룹 간 차이 분석: 굴곡 및 신전 활동도

<그림 11>에서 볼 수 있듯이, 두 그룹 모두 손목 움직임이 굴곡 후 신전하는 경향을 보였다. 그러나 상급 그룹의 굴곡/신전 활동도는 중급 그룹에 비해 현저히 작았다. 정량적 분석 결과, 상급 그룹의 손목 가동 범위는 $45.96 \pm 4.39^\circ$, 중앙값은 $44.51^\circ(42.48, 50.90)$ 인 반면, 중급 그룹의 가동 범위는 $63.77 \pm 6.24^\circ$, 중앙값은 $66.60^\circ(56.62, 68.10)$ 으로 나타났다. Z 검정 결과는 유의 수준($Z=-1.964, P=0.05$)에 근접하여 두 그룹 간의 굴곡/신전 활동도에서 유의한 차이가 있는 경향을 보였다.

이 결과는 중급 그룹이 손목을 신전하는 방향의 활동도가 더 크고, 상급 그룹은 손목 각도의 변화가 상대적으로 작음을 시사한다. 이러한 차이는 스트로크 과정에서 상급 그룹이 손목을 보다 안정적으로 제어하여 불필요한 손목 진동을 줄이고 스트로크의 정확도와 일관성을 향상시키는 데 도움이 될 수 있음을 시사한다.



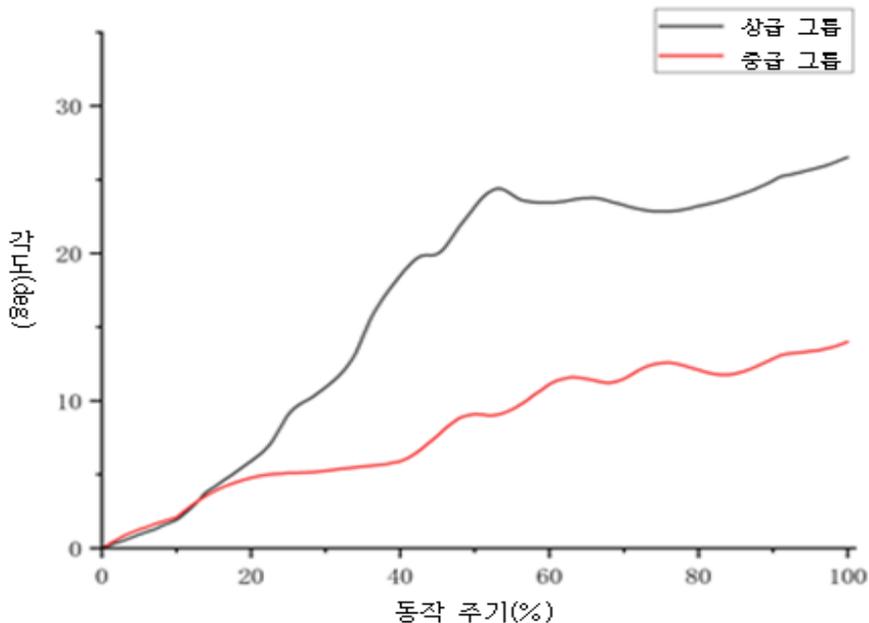
<그림 11> 손목 굴곡/신전 각도

참고: 양수 값은 굴곡 방향, 음수 값은 신전 방향

(3) 요측과 척측 편차 활동도

<그림 12>에서 알 수 있듯이, 요측 방향과 척측 방향에서 상급 그룹과 중급 그룹의 손목 운동 패턴은 유의한 차이를 보였다. 상급 그룹의 요/척 방향 활동도는 $44.87 \pm 6.50^\circ$, 중앙값은 47.33° (37.50, 49.77)였으며, 중급 그룹의 요/척 방향 활동도는 $23.72 \pm 8.67^\circ$, 중앙값은 26.87° (13.90, 30.40)이었다. Z 검정 결과 두 그룹 간에 요/척 방향의 활동성에서 유의한 차이가 있었다($Z = -1.964$, $P = 0.05$).

이 결과는 중급 그룹의 손목 활동도가 요/척 방향에서 상급 그룹에 비해 현저히 낮음을 나타낸다. 이는 상급 그룹이 스윙 과정에서 더 뛰어난 손목 유연성과 제어 능력을 가짐으로 인해 발생한 것으로 추측된다. 더 큰 활동 범위는 상급 그룹이 공을 칠 때 다양한 구속과 각도에 더욱 잘 적응할 수 있게 해주어, 스트로크의 정확도와 일관성을 높이는 데 기여할 수 있을 것으로 추정된다.



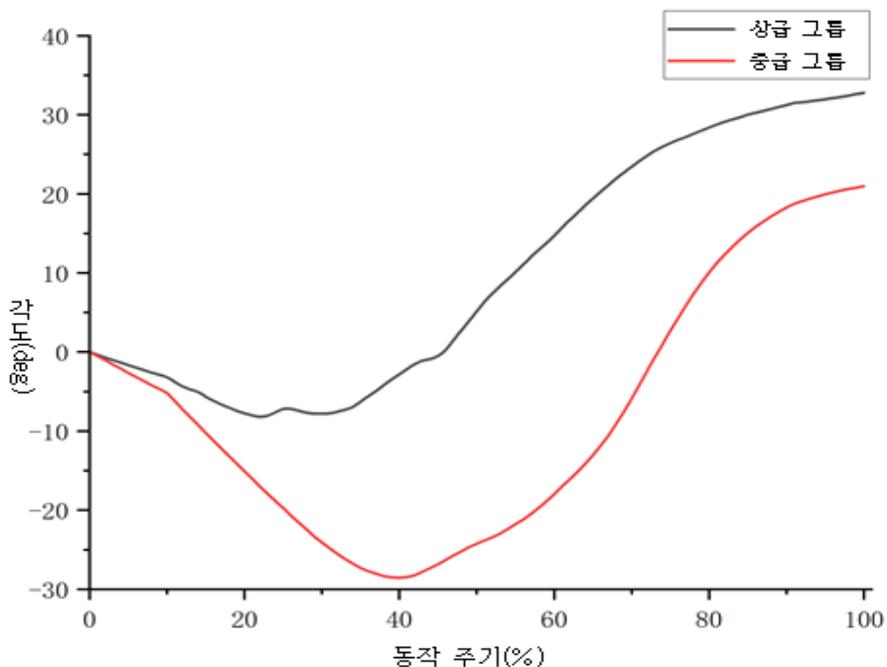
<그림 12> 손목 척측/요측 편차 각도

참고: 양수 값은 척골 편차 방향

(4) 내회전과 외회전 활동도

<그림 13>에서 알 수 있듯이, 내회전과 외회전 방향에서 상급 그룹과 중급 그룹의 손목 운동 패턴은 유사한 활동도를 보였다. 상급 그룹의 내회전/외회전 활동도는 $56.25 \pm 6.22^\circ$, 중앙값은 $58.90^\circ(49.15, 60.71)$ 였으며, 중급 그룹의 내회전/외회전 활동도는 $55.67 \pm 11.60^\circ$, 중앙값은 $59.70^\circ(42.58, 64.70)$ 이었다. Z 검정 결과 두 그룹 간의 내회전/외회전 활동도의 차이는 유의하지 않은 것으로 나타났다($Z = -0.218, P = 0.827$).

이 결과는 두 그룹의 손목 활동도가 내회전과 외회전 방향에서 비슷한 경향을 보인다는 것을 시사한다. 상급 그룹이든 중급 그룹이든 손목의 내회전과 외회전 과정에서 운동 통제 능력이 비교적 일치하다는 의미이다. 비록 활동도의 수치는 약간 다를 수 있지만, 이는 두 그룹이 해당 스트로크 동작을 수행할 때 손목의 회전 능력에 큰 차이가 없음을 시사한다.



<그림 13> 손목 내회전/외회전 각도

참고: 양수 값은 내회전 방향, 음수 값은 외회전 방향

손목 각도 변화 그림을 보면, 상급 그룹과 중급 그룹의 손목 각도 범위는 내회전과 외회전 방향에서 유의한 차이가 없었지만, 내회전과 외회전 방향의 손목 변화를 각각 따로 분석하면 다음과 같은 그림이 나온다. 또한, 굴곡과 신전 방향의 손목 각도 변화를 각각 따로 분석하여 중간 지점을 기준으로 상급 그룹과 중급 그룹의 손목 각도가 신전 방향과 외회전 방향에서 통계적으로 유의한 차이가 있음을 분석하였다. 아래 그림과 같이, 신전과 외회전 각도에서 중급 그룹은 상급 그룹보다 각도가 유의하게 더 크며, 중급 그룹의 각도 변화 범위가 더 넓고 변이성이 더 큰 것을 확인할 수 있었다.

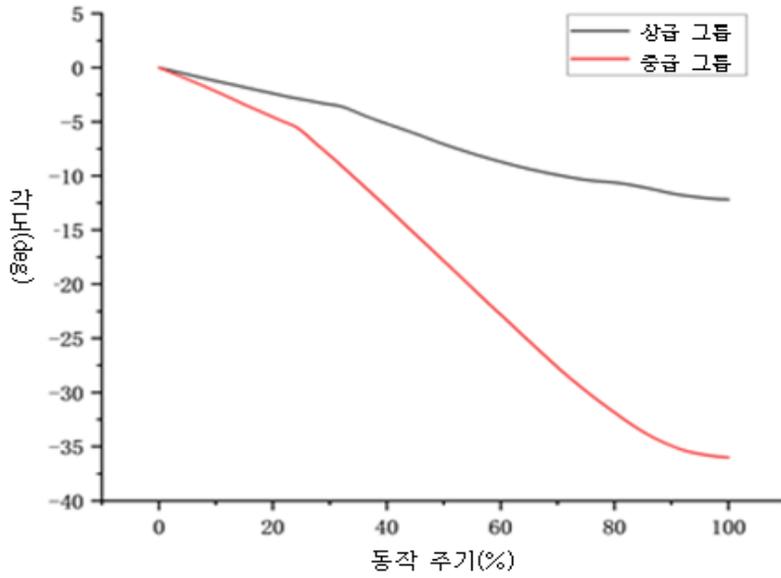
<표 7> 신전 및 외회전 활동도(deg)

방향	상급 그룹	중급 그룹
신전	15.68±8.08	36.78±10.89
외회전	13.23±6.35	29.06±8.95

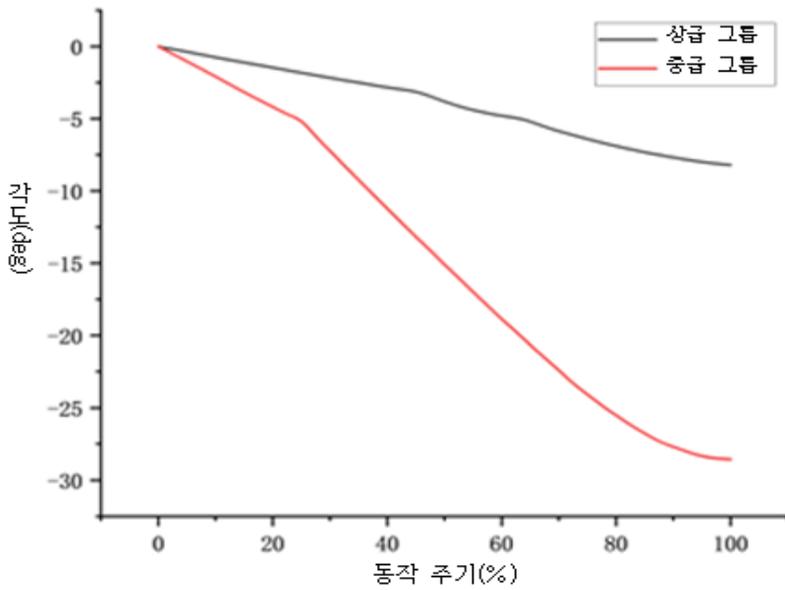
<표 8> 신전 및 외회전 활동도 통계학적 검정 결과

변수	상급 그룹	중급 그룹	Z	P
신전	19.38 (6.41,21.25)	32.28 (28.86,49.20)	-1.964	0.05
외회전	14.82 (6.24,18.63)	27.27 (21.15,38.78)	-1.964	0.05

*P ≤ 0.05



<그림 14> 손목 신전 각도

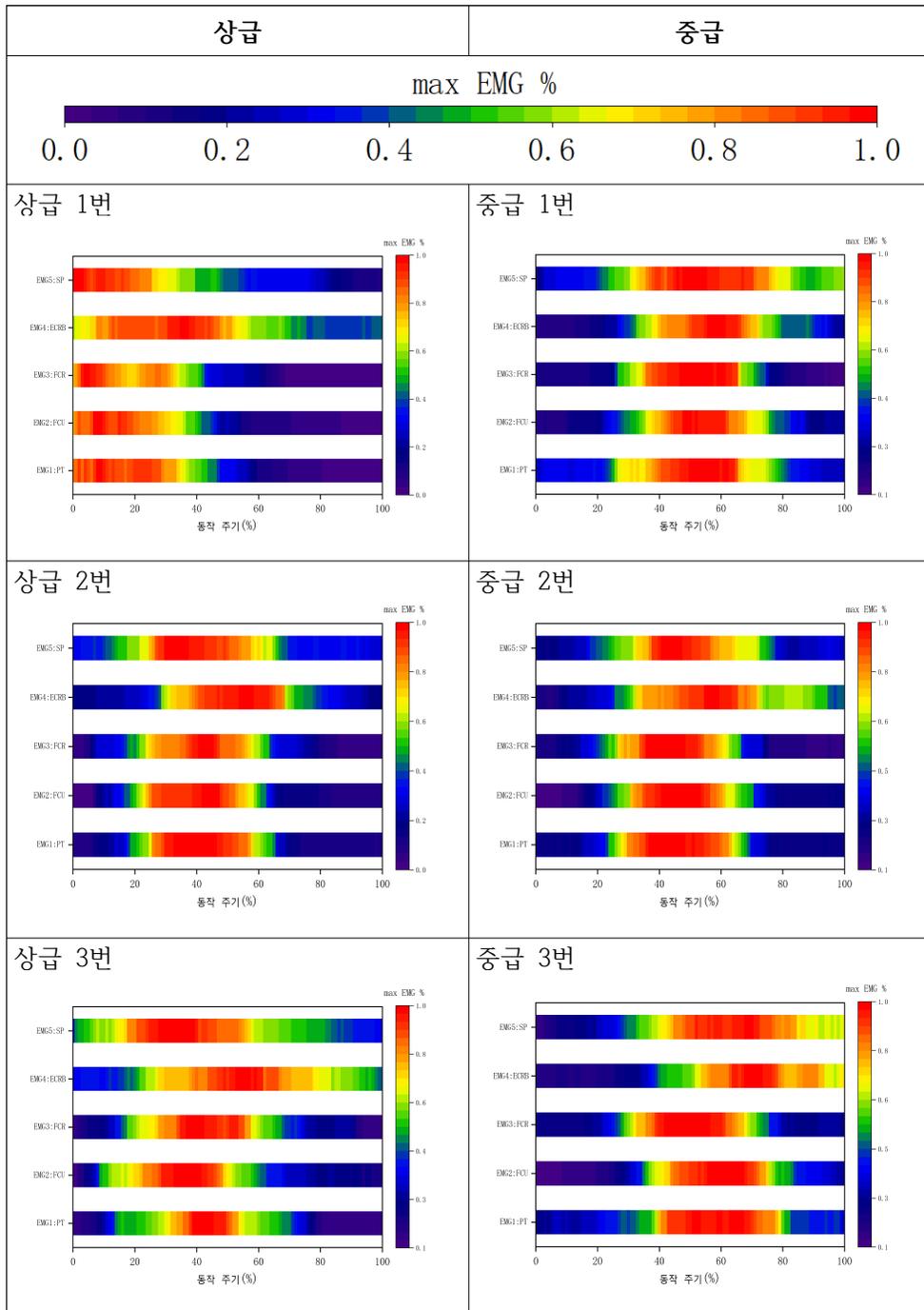


<그림 15> 손목 외회전 각도

제 2 절 표면 근전도 데이터 처리

1. 근육 활성화도

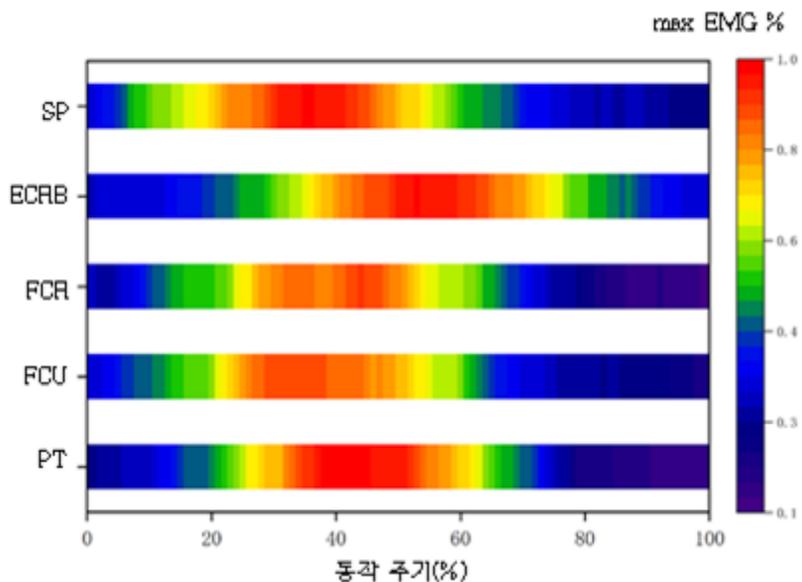
본 연구에서는 원시 표면 근전도 신호의 정류, 평활 및 필터 처리를 진행하여 잡음을 제거하고 유효한 신호를 추출하였다. 이를 통해 테니스의 포핸드에서 해당 근육의 최대 진폭 백분율(Max EMG %)을 계산해 스트로크 과정에서의 근육 활성화 정도를 분석했다.



<표 9> 상급 그룹과 중급 그룹 각각의 근육 활성화도 분포

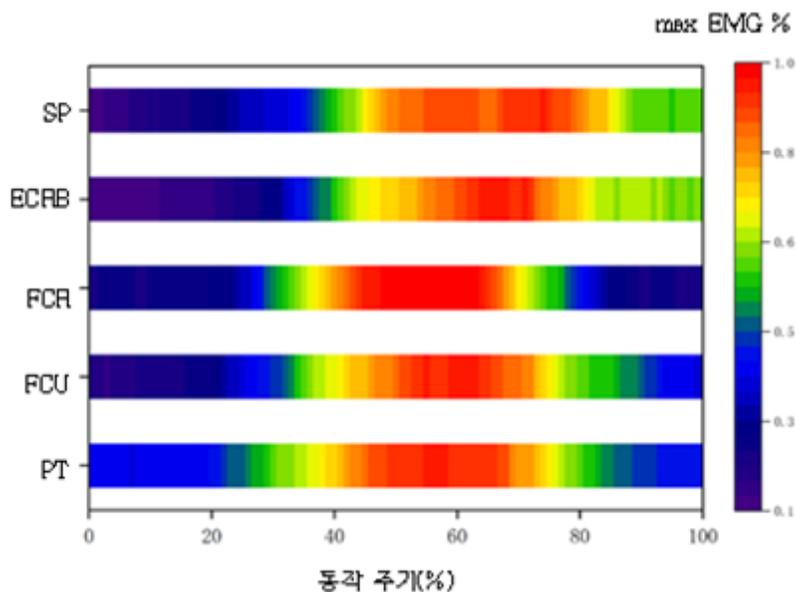
<표 9>는 상급 그룹과 중급 그룹 각 선수의 근육 활성화도 분포도를 나타낸다. 상급 그룹 1번 선수의 5개 근육의 활성화도는 초기에 전반적으로 높게 나타났다. 특히 타격 동작 전인 초기 단계에서 거의 모든 근육들이 활성화되며, 이는 해당 선수의 동작 준비가 빠르게 이루어짐을 의미한다. 2번과 3번 선수의 활성화 패턴도 유사한 경향을 보였다. 각 근육의 활성화 시간이 다소 차이가 있지만, 전체적으로 SP와 FCU의 활성화도가 상대적으로 앞쪽에 위치한다. ECRB의 활성화도는 명확하게 지연되어 보이며, 대체로 동작의 중후반에 활성화되었다.

중급 그룹 선수 3명의 근육 활성화도는 전체적으로 동작 주기의 40~60% 사이에 집중되어 있었다. 이는 중급 그룹 선수들이 포핸드 스트로크를 수행할 때, 활성화 시간이 상대적으로 중간 지점에 집중되어 있다는 것을 나타낸다. 중급 그룹 1번과 2번 선수들의 근육 활성화 패턴은 비교적 유사하며, 각 근육의 활성화도 분포가 고르게 나타나고, 5개 근육의 활성화도 간의 차이가 적었다.



<그림 16> 상급 그룹 근육 활성화도 분포

상급 그룹 선수 3명과 중급 그룹 선수 3명의 평균 근육 활성도를 비교한 결과는 <그림 16>과 같다. PT부터 SP까지의 활성도는 전체 동작 주기에 걸쳐 동태적으로 변화하며, 특히 30~60% 기간의 변화가 가장 두드러지고, 80~100% 기간의 변화는 상대적으로 미미했다. 이러한 동태적 변화는 다양한 근육의 활성화 패턴이 동작 단계에 따라 변화함을 반영하며, 스트로크 동작의 복잡성과 여러 근육에 대한 의존성을 가지고 있음을 의미한다. FCU, FCR 및 SP는 30~50% 기간 동안 높은 활성도를 보였고, PT 및 ECRB는 40~60% 기간 동안 가장 높은 활성도를 나타냈다. 일반적으로 FCU와 ECRB는 약 90% 기간 동안 높은 활성도를 유지하였다.



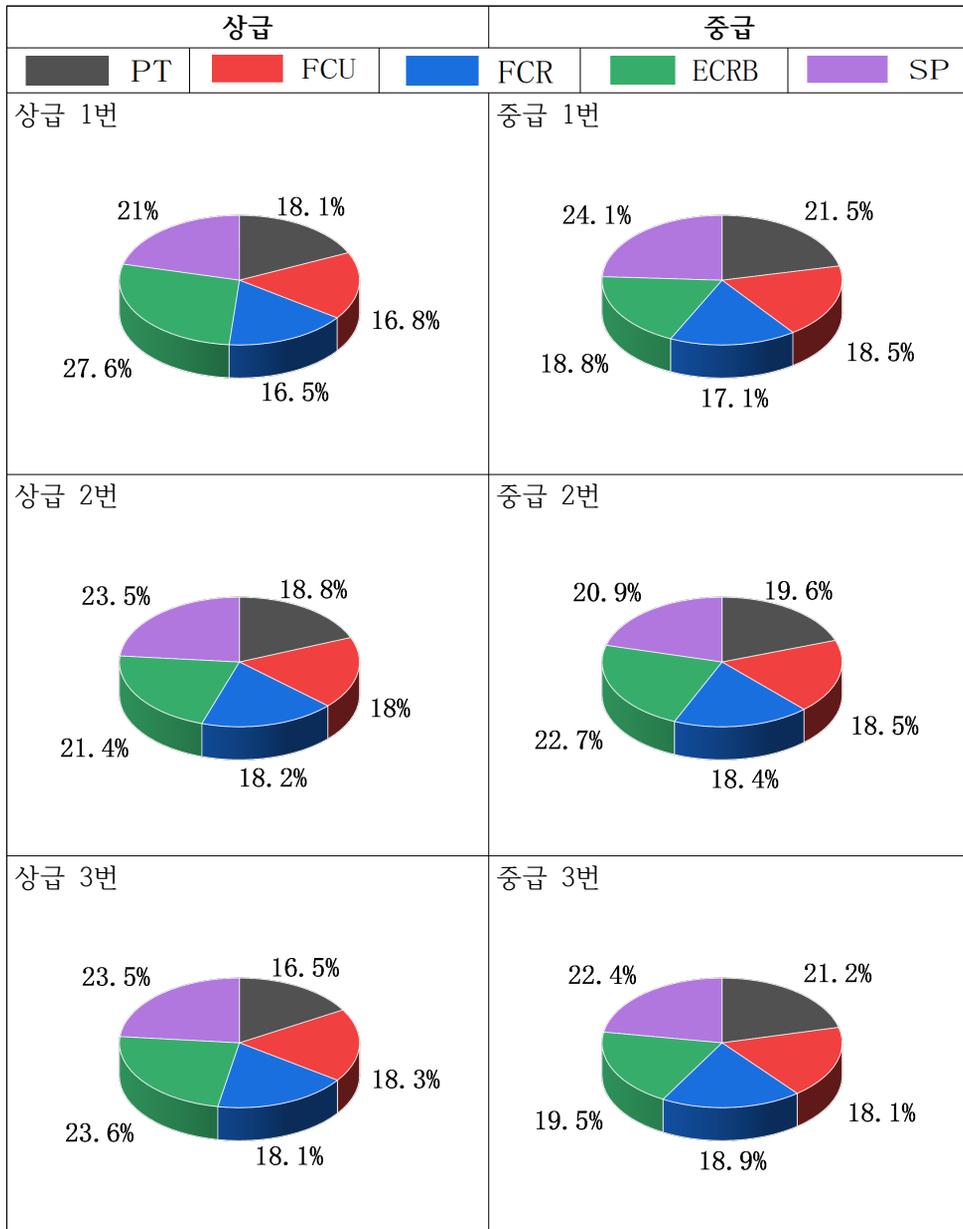
<그림 17> 중급 그룹 근육 활성화도 분포

중급 그룹은 상급 그룹에 비해 0~20% 기간의 활성화 정도가 일반적으로 낮게 나타났으며, 운동이 진행됨에 따라 20%에서 활성화 정도가 상승하기 시작하여 40~70% 기간 동안 최고 수준에 도달한다. SP는 운동 주기 전반에 걸쳐 높은 활성도를 유지하며, 특히 후반 단계인 동작의 완

료 과정에서 그 중요한 영향을 미친 것으로 파악할 수 있다. 중급 그룹에서 PT부터 ECRB까지의 활성화 정도는 거의 비슷했지만, FCR은 90~100% 기간 동안 거의 활성화되지 않았다.

종합적으로 포핸드를 치는 동안 상급 그룹과 중급 그룹 간에 근육 활성화 정도에서 유의한 차이가 있었다. 상급 그룹은 30~60% 주기 동안 높은 활성화 수준을 보였고, 특히 FCU와 ECRB는 90% 주기 동안 높은 활성화를 유지하였다. 이와 함께 SP는 이 단계에서 가장 뚜렷한 변화를 보였다. 반면, 중급 그룹은 0~20% 주기에서 낮은 활성도를 보였으나 40~100% 주기 동안 SP의 활성화도가 뚜렷하게 증가하였다. 중급 그룹의 PT, FCU, FCR 및 ECRB의 활성화 정도는 유사하였으나, FCR는 후반 단계에서 거의 활성화되지 않아 참여 정도가 낮음을 보여주었다. 이러한 결과는 다양한 기술을 가진 선수들이 공을 칠 때 근육의 활성화 방식에 있어 다른 패턴을 보여주었다.

2. 근육 전체 기여도

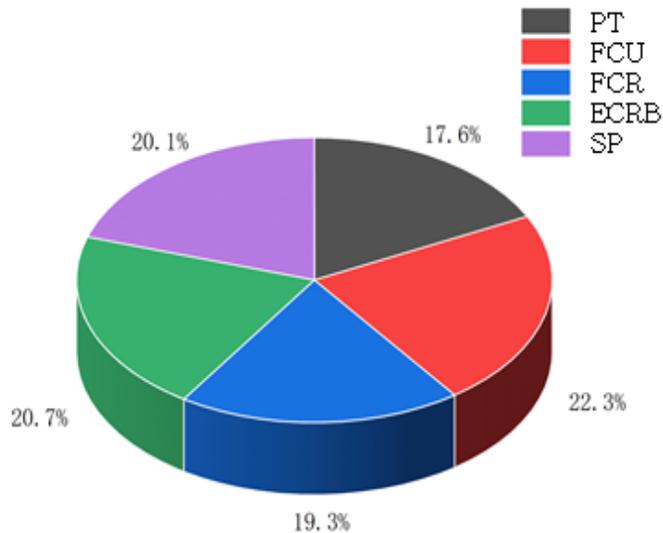


<표 10> 상급 그룹과 중급 그룹 각각의 근육 전체 기여도

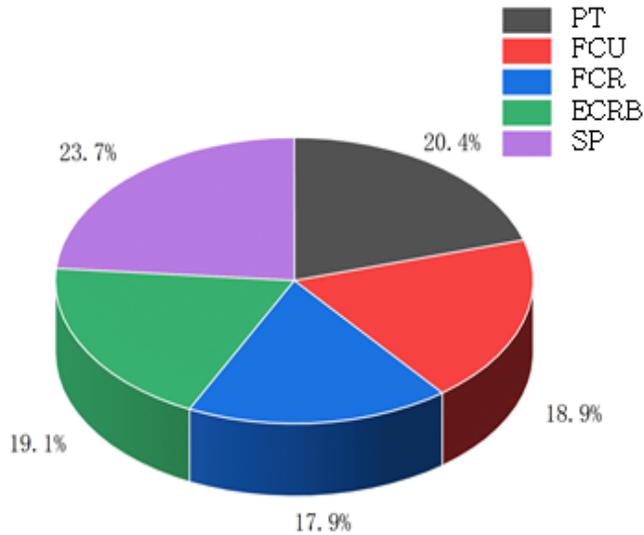
상급 그룹의 선수 3명은 근육의 전체 기여도에서 PT, FCU 또는 FCR의 비율에 상관없이 ECRB와 SP가 항상 가장 높은 비율을 차지하였다. 또한 PT, FCU, FCR의 비율은 3명의 선수 모두에서 16%~18% 범위에 걸쳐 나타났으며, 비교적 고른 분포를 보였다.

중급 그룹의 3명의 선수 중 1번과 3번 선수는 SP가 전체 기여도에서 가장 높은 비율을 차지했으며, 그 다음으로 PT와 ECRB가 높은 기여율을 보였다. 반면 2번 선수는 ECRB 근육의 기여율이 가장 높았으며, 그 다음으로 SP와 PT 근육이 높은 비율을 나타냈다.

전반적으로 상급 그룹은 특정 근육인 ECRB와 SP에서 주도적인 역할이 뚜렷하게 보였으며, PT, FCU, FCR의 기여율은 안정적이고 조화를 이루었다. 이는 상급 선수들이 스트로크 동작에서 근육 분배를 최적화했음을 보여준다. 이에 비해 중급 그룹은 주요 근육의 기여도가 상대적으로 분산되어 있으며, 일관적으로 주도하는 근육이 부족한 모습을 보였다.



<그림 18> 상급 그룹 근육 전체 기여도



<그림 19> 중급 그룹 근육 전체 기여도

<그림 18>과 <그림 19>는 상급 그룹과 중급 그룹 선수들의 평균 근육 전체 기여도의 차이를 보여준다.

상급 그룹에서는 FCU의 근육 방전 기여도가 22.3%로 가장 높게 나타났으며, 이 근육이 포핸드 시 더 활발하게 작용하는 것으로 나타났다. 이는 아마도 상급 선수들이 스트로크 과정에서 더 빈번하게 FCU를 사용하여 손목의 굴곡과 안정성을 조절함으로써 더 정확한 스트로크와 힘 전달을 실현하기 때문일 것이다. PT의 기여도는 17.6%로 가장 낮게 나타났다. 이는 상급 선수들이 스트로크 시 PT에 대한 의존도가 상대적으로 낮음을 나타내고, 이는 이 근육의 기능이 주로 전완의 회전에 집중되기 때문이며, 상급 선수들은 전완의 회전 각도를 조절하기 위해 다른 근육을 더 잘 활용할 수 있음을 의미한다.

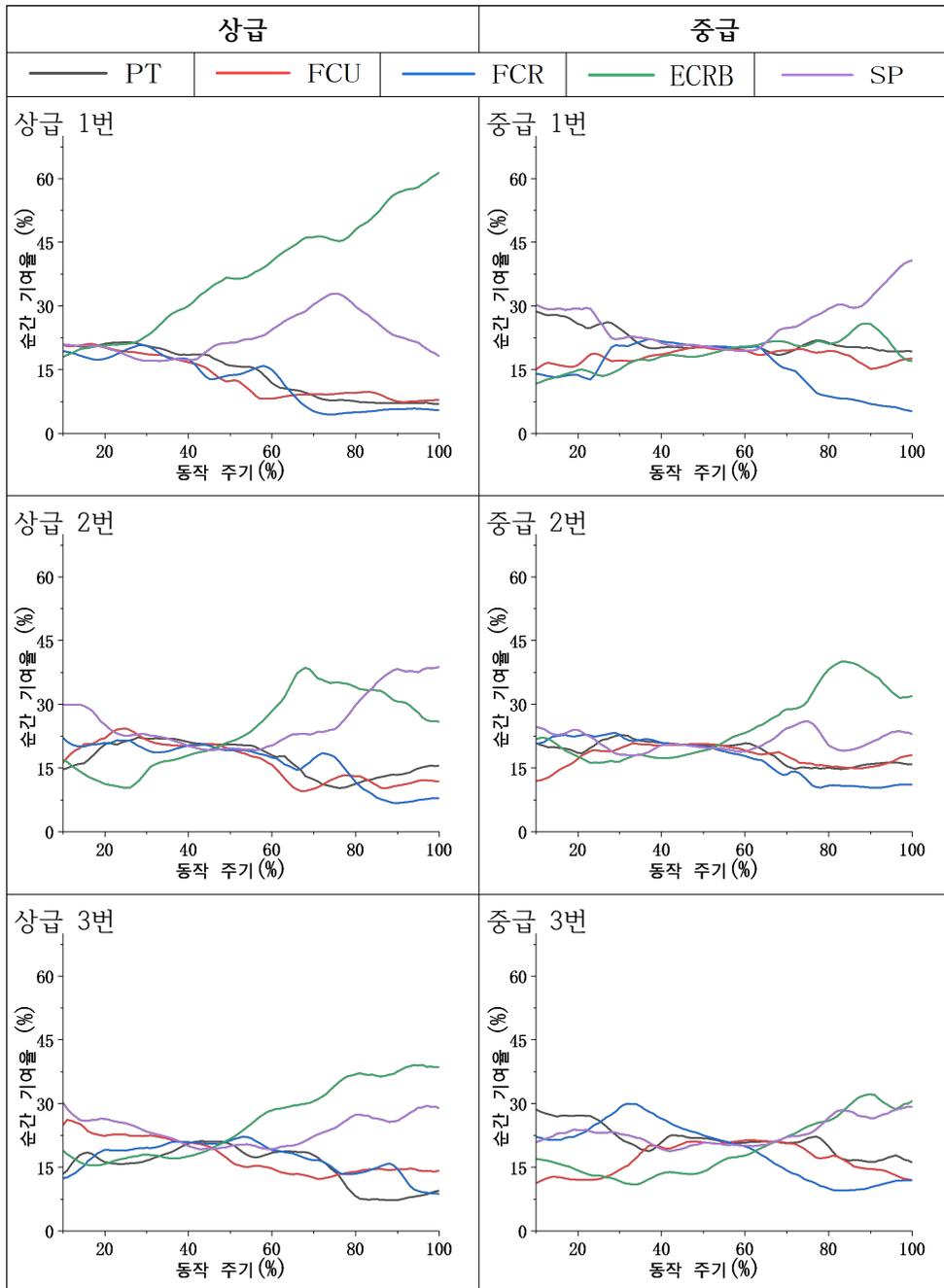
반면, 중급 그룹에서는 SP의 기여도가 23.7%로 가장 높게 나타났으며, 이는 중급 선수들이 포핸드 스트로크를 할 때 SP 근육의 기여도가 더 높다는 것을 의미한다. 또한, 중급 선수가 손목의 외회전 동작을 수행할 때 더 높은 수준의 SP 활성화가 필요하며, 전완의 회전 제어에 있어 부

족한 부분이 있음을 반영하고, 스트로크를 완성하기 위해 더 많은 근육들의 협동이 필요함을 보여준다. 또한 FCR의 기여도가 17.9%로 가장 낮게 나타났는데, 중급 그룹이 스트로크 시 FCU의 기여도가 낮음을 나타냈으며, 이는 중급 선수들이 손목 굴곡과 제어에 있어 부족함이 있음을 반영한다.

전체적으로 상급 그룹은 FCU의 기여도가 높게 나타났는데, 이는 포핸드 스트로크 시 굴곡 동작을 효과적으로 활용하여 라켓을 제어하는 데 대한 숙련도가 높음을 의미한다. 반면 중급 그룹은 SP에 대한 의존도가 비교적 높아 전완 회전 제어에 있어 근육의 보조가 필요하여 동작의 안정성을 유지해야 함을 반영한다. 두 그룹은 서로 다른 근육의 기여도에서 유의한 차이를 보이며, 이는 선수들의 수준에 따라 손목과 전완의 근육 사용 방식에 상당한 차이가 있음을 시사한다.

3. 근육 순간 기여도

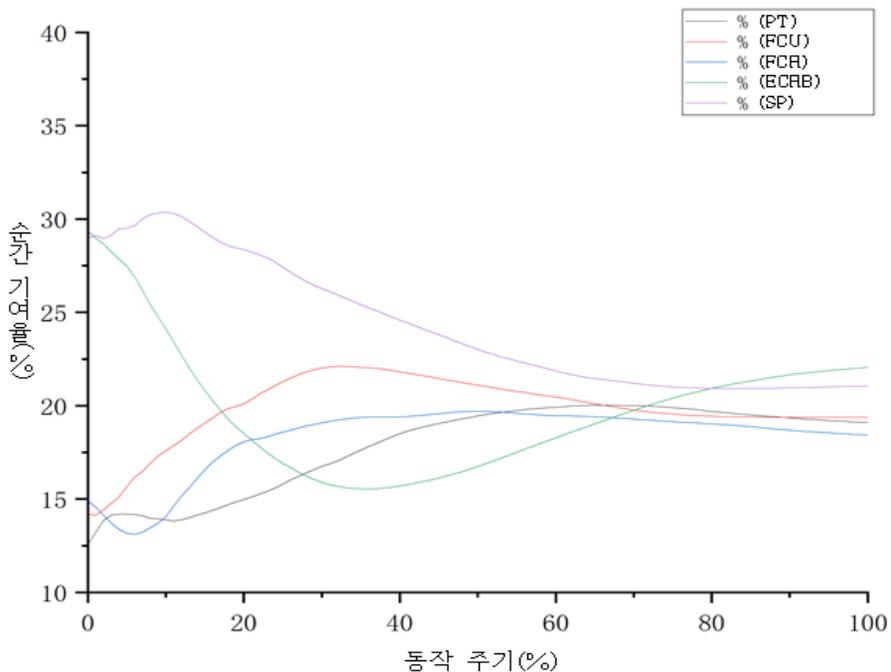
중급 및 상급 그룹의 각 근육이 전체 과정에서 차지하는 기여도와 스트로크 과정 중 순간적인 근육 기여도를 분석하였다.



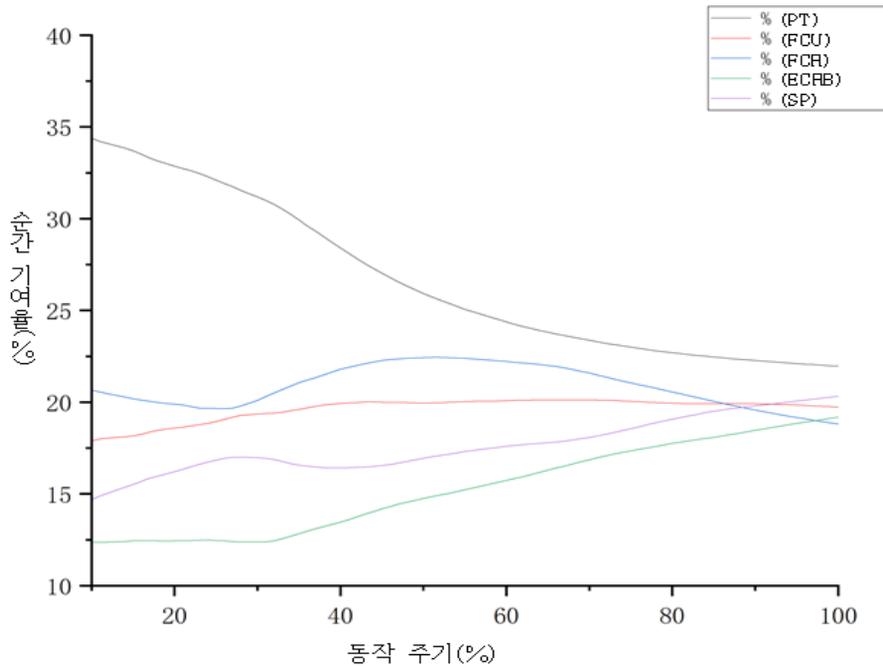
<표 11> 상급 그룹과 중급 그룹 각각의 근육 순간 기여도

상급 그룹과 중급 그룹 각 운동선수의 근육 순간 기여율 그래프를 분석한 결과, 상급 그룹에서는 ECRB와 SP 근육이 전체 스트로크 과정에서 상대적으로 높은 기여율을 보였으며, 나머지 세 근육의 기여율은 비교적 균형 있게 나타났다. 반면, 중급 그룹 운동선수 3명은 스트로크 과정에서 비교적 균등한 근육 기여도를 보였으며, 특히 스트로크의 40%~60% 구간에서는 모든 근육의 기여율이 거의 비슷한 수준을 보여, 이 단계에서 각 근육의 기여율이 균형을 유지하고 있음을 알 수 있었다.

종합적으로 볼 때, 상급 그룹 운동선수의 근육 기여도는 특정 근육에 더 집중되어 있으며, 스트로크 과정에서 근육 활성화 정도에는 뚜렷한 편향성이 나타났다. 반면, 중급 그룹은 스트로크 중간 단계에서 특히 더 균형 잡힌 근육 활성화 패턴을 보여주었다.



<그림 20> 상급 그룹 근육 순간 기여도



<그림 21> 중급 그룹 근육 순간 기여도

<그림 20>과 <그림 21>은 상급 및 중급 그룹 선수들의 평균 근육 순간 기여도의 차이를 보여준다.

포워드 스윙 단계가 시작될 때, 상급 그룹의 ECRB와 SP는 상대적으로 높은 기여도를 보였으며, PT, FCU와 FCR의 기여도는 낮고 유사하게 나타났다. 이에 비해, 중급 그룹은 포워드 스윙 단계가 시작될 때 PT의 기여도가 높았으며, 나머지 근육들의 기여도는 FCR, FCU, SP, ECRB 순으로 나타났다.

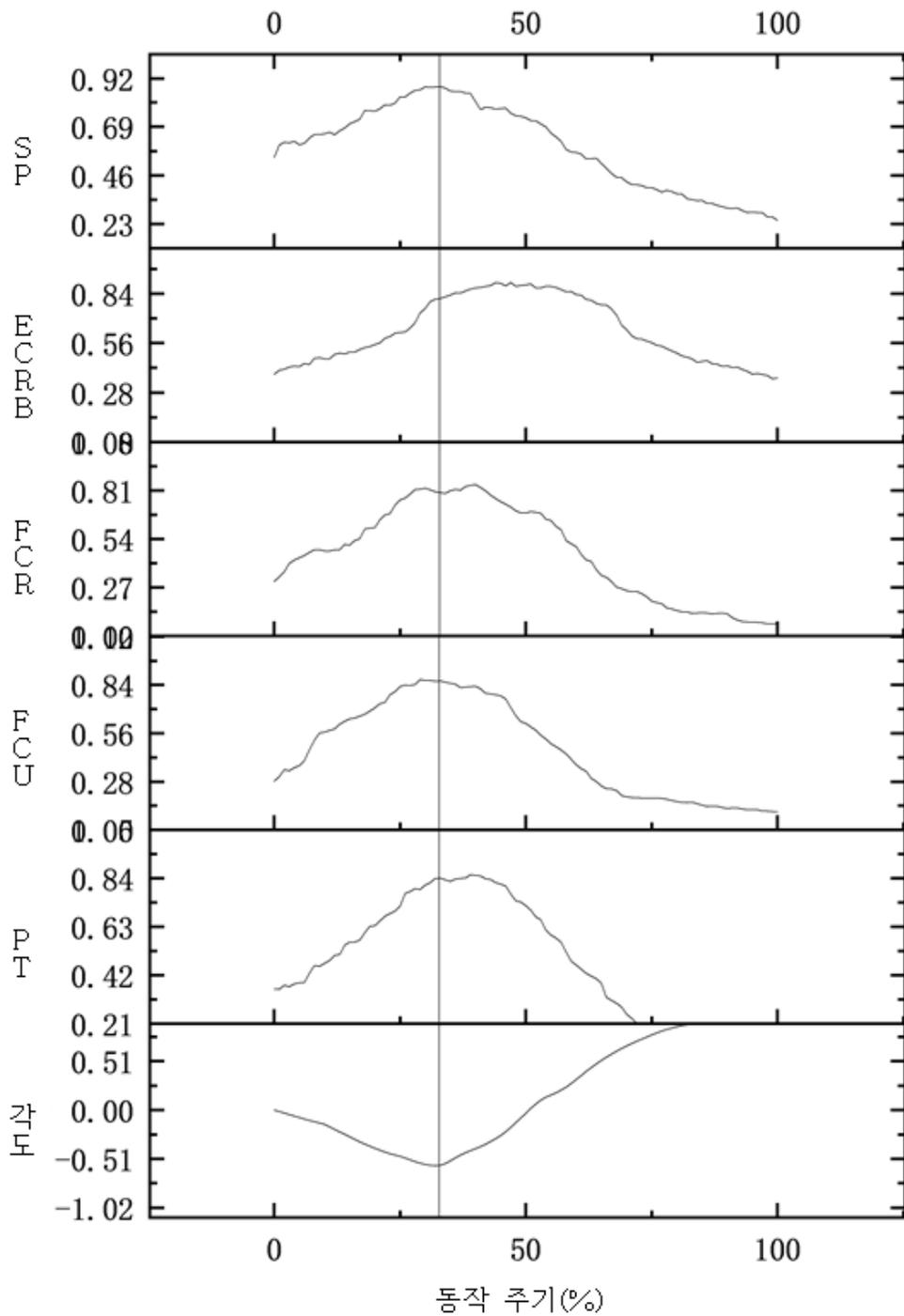
상급 그룹은 포워드 스윙 단계에서 ECRB와 SP의 기여도가 상대적으로 높았고, 다른 근육들의 기여도는 낮고 유사한 경향을 보였다. 이는 상급 그룹이 이 단계에서 신전과 외회전 동작 제어에 더 집중했음을 나타내며, 다른 근육들의 역할은 상대적으로 작다는 것을 유추할 수 있다. 중급 그룹은 다른 근육 활성화 패턴을 보였으며, PT의 기여도가 가장 높아 중급 그룹이 포워드 스윙을 시작할 때 내회전의 근육 활성화에 더 의

존했다. 동시에 다른 근육들의 기여도는 비교적 균일하게 나타나 중급 그룹의 근육 활성화가 상대적으로 분산되어 있음을 확인할 수 있다.

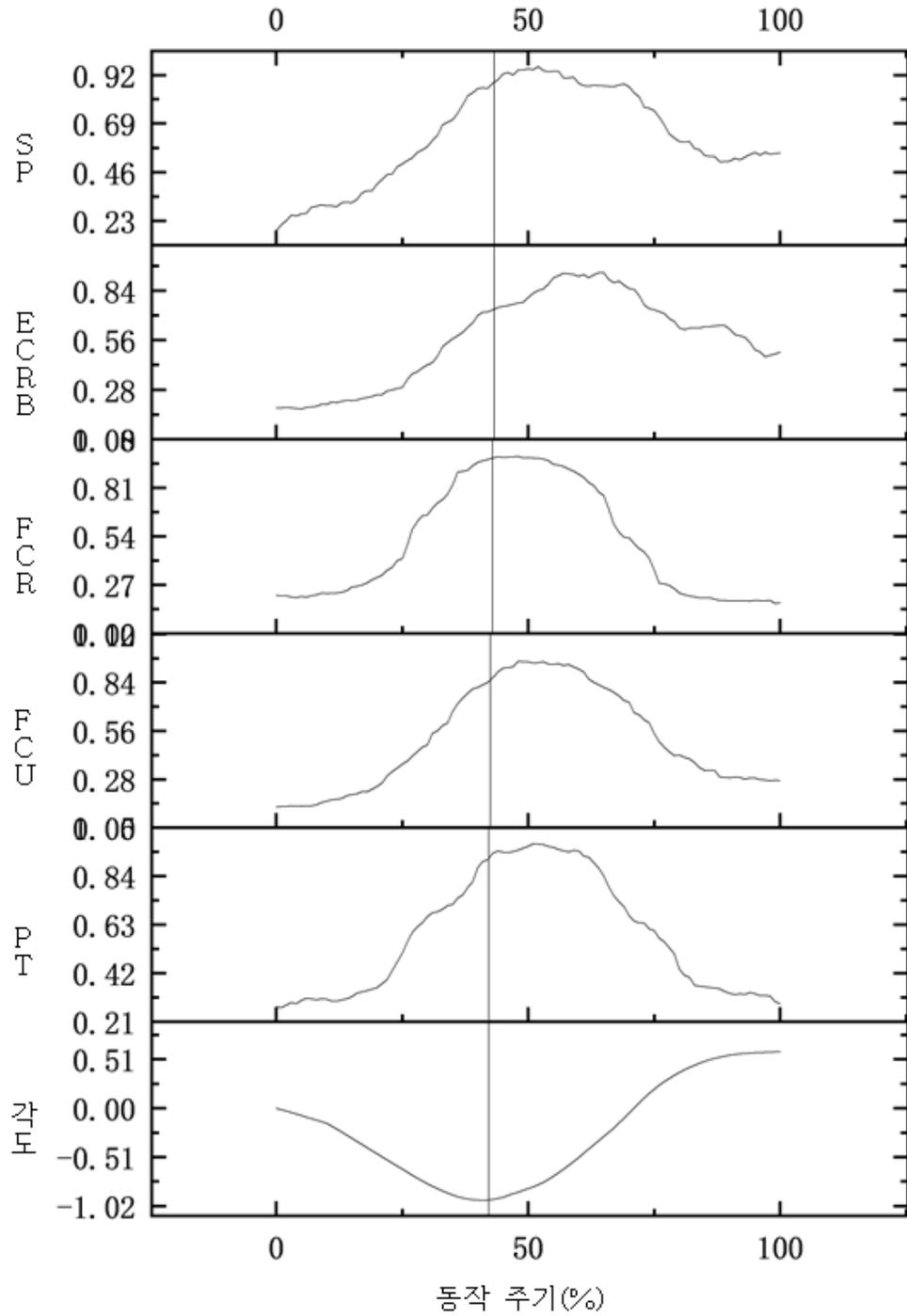
제 3 절 손목 각도 변화 시점에서의 근육 활성화 차이

1. 신전-굴곡 변화 시점과 근육 활성화

손목 각도가 신전에서 굴곡으로 변화할 때 5개의 근육의 활성도를 분석했다. 통계 분석 결과에 따르면, 상급 그룹과 중급 그룹은 손목 굴곡과 신전 각도 변화 시점에서 FCR과 SP 근육의 활성화에 유의한 차이가 있었다. 중급 그룹의 FCR은 손목이 신전에서 굴곡으로 전환될 때 더 큰 영향을 미치며, 상급 그룹의 SP는 손목 신전에서 굴곡으로 전환될 때 더 큰 영향을 미쳤다.



<그림 22> 상급 그룹 신전/굴곡-근육 활성화도



<그림 23> 중급 그룹 신전/굴곡-근육 활성화도

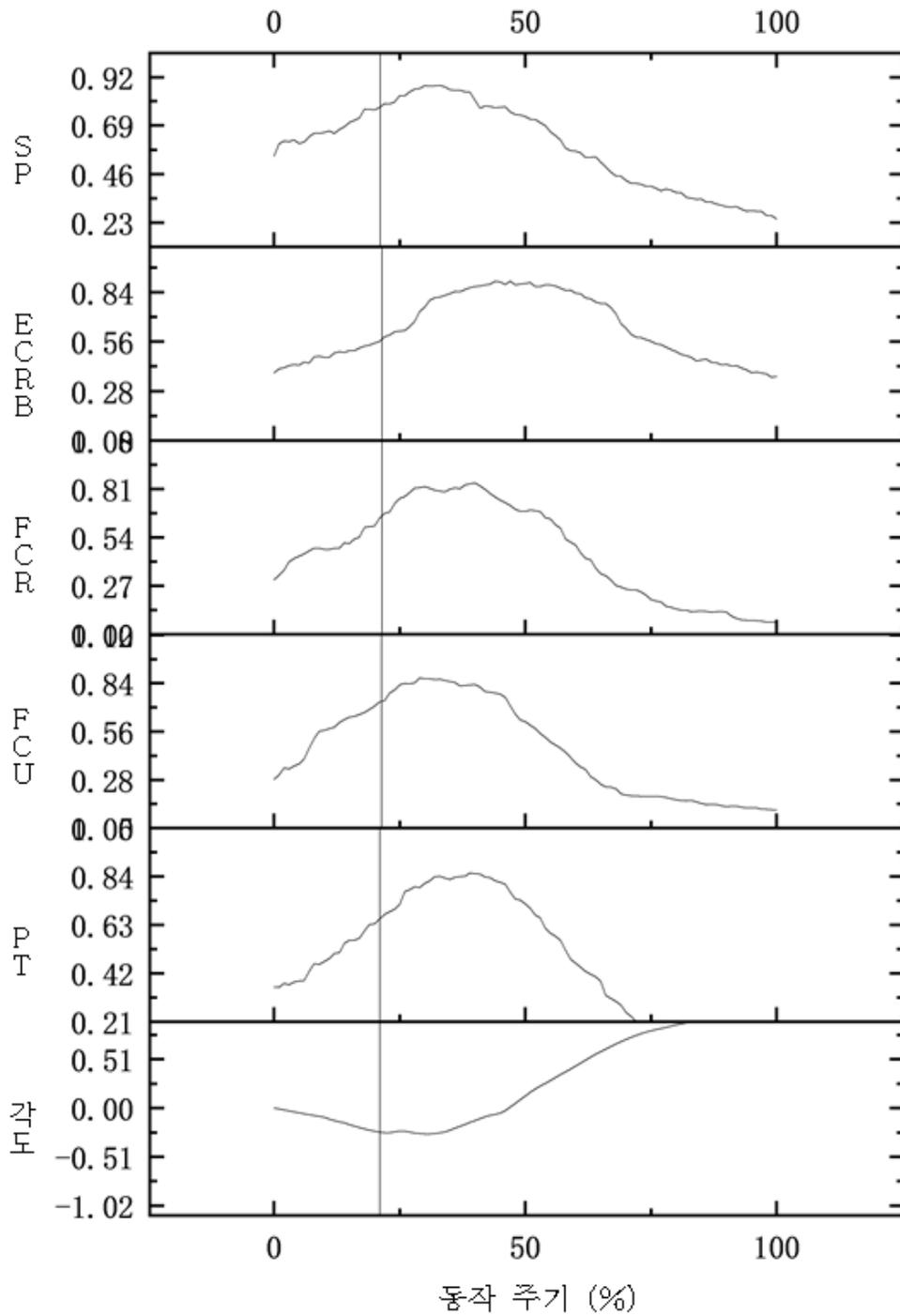
<표 12> 신전/굴곡-활동도 통계학적 검정 결과

변수	상급 그룹	중급 그룹	Z	P
PT	0.86(0.78,0.97)	0.93(0.88,0.95)	-0.655	0.513
FCU	0.92(0.90,0.97)	0.84(0.80,0.91)	-1.528	0.127
FCR	0.83(0.75,0.84)	0.99(0.93,1.00)	-1.964	0.050
ECRB	0.77(0.73,0.87)	0.79(0.56,0.81)	-0.218	0.827
SP	0.99(0.90,1.00)	0.78(0.76,0.89)	-1.964	0.050

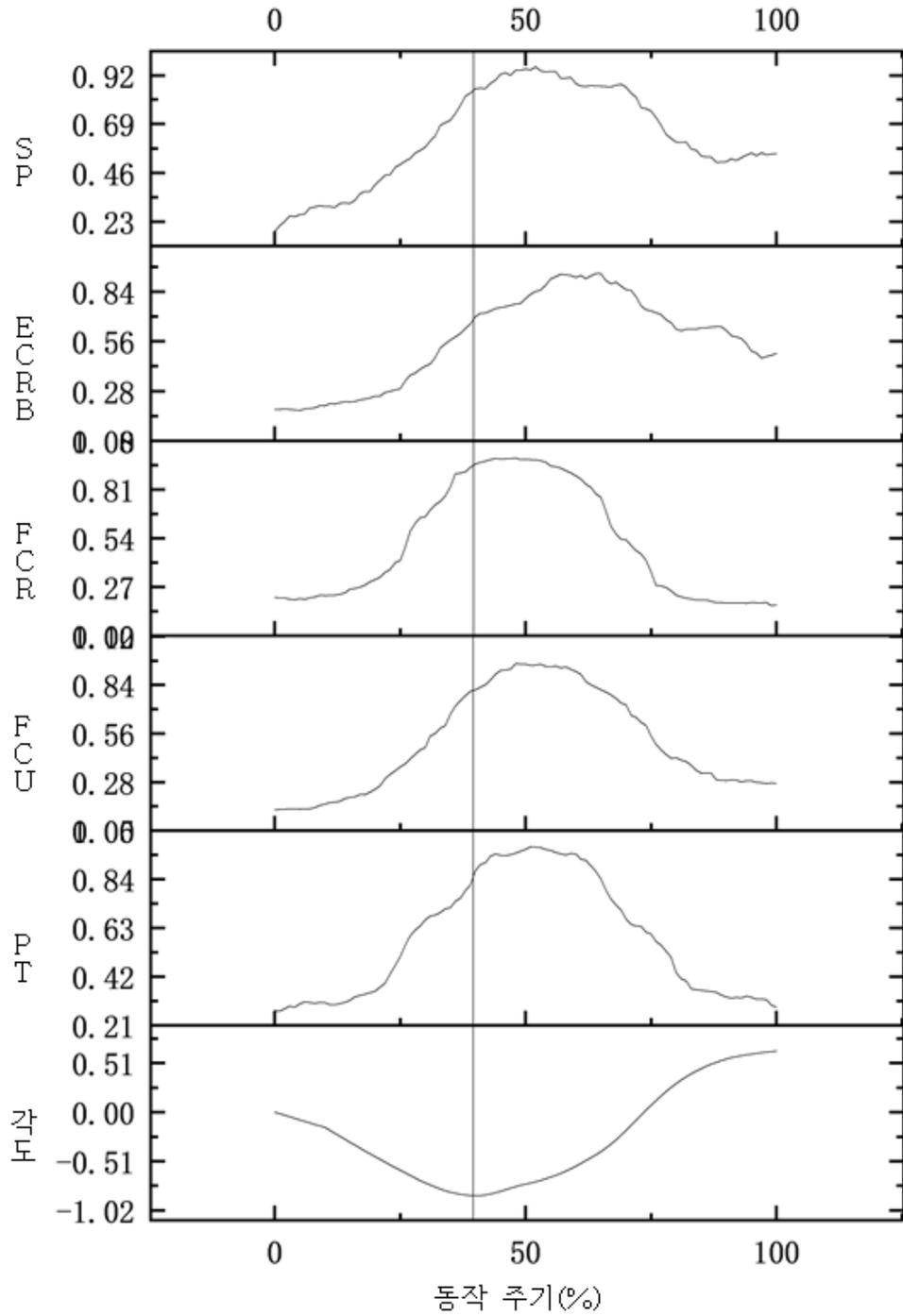
*P ≤ 0.05

2. 외회전-내회전 변화 시점과 근육 활성화도

손목 각도가 외회전에서 내회전으로 변화할 때 5개의 근육의 활성화도를 분석했다. 통계 분석 결과에 따르면, 상급 그룹과 중급 그룹은 손목 외회전과 내회전 각도 변화 시점에서 FCR 근육의 활성화도에 유의한 차이가 있었다. 중급 그룹의 FCR 활성화도가 고급 그룹의 FCR 활성화도보다 유의하게 높았다.



<그림 24> 상급 그룹 외회전/내회전-근육 활성화도



<그림 25> 중급 그룹 외회전/내회전-근육 활성화도

<표 13> 외회전/내회전-활동도 통계학적 검정 결과

변수	상자 그룹	중급 그룹	Z	P
PT	0.86(0.78 , 0.97)	0.93(0.86,0.95)	-0.218	0.827
FCU	0.92(0.90,0.97)	0.84(0.78,0.91)	-1.528	0.127
FCR	0.81(0.75,0.84)	0.99(0.91,1.00)	-1.964	0.050
ECRB	0.77(0.72,0.87)	0.78(0.56,0.79)	-0.218	0.827
SP	0.98(0.90,0.99)	0.78(0.76,0.92)	-1.528	0.127

*P ≤ 0.05

제 5 장 논의

본 연구에서는 수준별 테니스 선수들의 손목 각도 변화와 근육 활동을 비교 분석하였으며, 손목 각도 변화에 따른 전완근의 활성화 차이도 함께 분석하여 테니스 포핸드 스트로크 과정에서 근육의 협응성과 기술적 특징에 대한 포괄적인 시각을 제공하였다.

동작 시간 분석 결과 상급 그룹과 중급 그룹은 기술 수준에서 차이가 일부 있었음에도 불구하고, 두 그룹의 스트로크 시간은 거의 일치하는 경향을 보였다. 이는 수준별 테니스 선수들이 스트로크 시 동작 시간을 비슷하게 수행할 수 있음을 나타내고, 이전 진행되었던 연구들과 일치한다. 또한, 훈련 과정에서 표준화된 동작 기술과 전략이 보편적임을 반영한다(Landlinger et al., 2010).

손목 각도 활동도를 분석한 결과, 굴곡과 신전, 요측 및 척측 편차, 내회전과 외회전 방향의 곡선에서 상급 그룹의 손목 각도 변화 추세는 Loushin의 연구 결과와 일치하는 것으로 나타났다. Loushin의 연구에서는 준엘리트 수준의 운동선수들이 포핸드 스트로크 시 손목 각도가 크게 척측으로 편차되며, 스트로크 시 손목이 최대 척측 편차 위치에 있다고 주장하였다(Loushin et al. 2022). 실험 결과에 따르면 상급 그룹의 손목 각도가 척측 편차 방향에서 더 큰 각도를 보이며, 포워드 스윙 시작부터 손목 각도가 지속적으로 척측 편차 상태를 유지하는 것과 일치한다. 이는 수준별 테니스 운동선수들이 손목 각도 변화에서 뚜렷한 차이를 보임을 의미한다. 실험을 통해 상급 그룹과 중급 그룹의 포워드 스윙 시작부터 종료까지 손목 각도 변화 차이를 정확히 비교하였다. 굴곡과 신전 방향에서 중급 그룹의 손목 활동 범위가 상급 그룹보다 훨씬 크게 나타났으며, 이는 상급 그룹이 손목을 더 안정적으로 제어하고 불필요한 손목 떨림을 줄여 스트로크의 정확성과 일관성을 높였음을 나타냈다. 상급 그룹과 중급 그룹의 손목 운동 패턴은 유사한 활동도를 보였으며, 내회전

과 외회전 과정에서도 손목의 운동 제어 능력은 일관되게 유지되었다. 비록 활동도의 수치에는 다소 차이가 있었으나, 두 그룹이 관련 스트로크 동작을 수행할 때 손목 회전 능력에 큰 차이가 없었다.

근육 활성화도의 분석 결과, 상급 그룹과 중급 그룹의 근육 사용 패턴에서 뚜렷한 차이가 있었다. 상급 그룹은 동작 주기의 30%~60% 구간에서 더 높은 활성도를 보였으며, 이와 달리 FCU와 ECRB는 스트로크의 다른 단계에서 중요한 역할을 수행했고, 이는 상급 그룹이 근육 활성화 과정에서 더 정교하고 단계적인 활용 능력을 가지고 있음을 보여준다. 이는 그들이 특정 근육을 보다 효율적으로 조정하여 힘의 전달과 운동의 정확성을 최적화할 수 있다는 것을 의미한다. 반면, 중급 그룹은 전체적으로 근육 활성화도가 더 균일하고 활성화 시간이 다소 지연되었으며, 후반부에 더 균등하게 분포하는 경향을 보였다. 이는 그들이 근육 협응력에서 부족함을 의미하며, 각 근육의 독특한 역할을 충분히 활용하지 못하는 대신 전체적으로 힘을 사용하는 경향이 있어 힘 전달 효율성이 낮고 스트로크의 강도와 정확성에도 부정적인 영향을 미친다. 이러한 근육 활성화 패턴의 차이는 서로 다른 수준의 운동선수들이 기술 실행과 힘 활용에서 뚜렷한 차이를 보임을 반영한다.

근육 전체 기여도 분석에서는 상급 그룹과 중급 그룹 간에 뚜렷한 차이가 나타났다. 상급 그룹에서는 FCU의 기여도가 가장 높았으며, 이는 운동선수들이 플랫 스트로크 과정에서 손목의 굴곡과 안정성을 제어하는데 이 근육을 더 많이 사용한다는 것을 의미한다. 반면, PT의 기여도는 가장 낮게 나타났는데, 이는 이 동작 패턴에서 내회전 근육에 대한 요구가 상대적으로 낮음을 시사한다. 이와 대조적으로 중급 그룹은 SP의 기여도가 가장 높게 나타났는데, 이는 중급 운동선수들이 평타 스트로크 시 외회전 근육의 활성화에 더 의존하며, 기술이나 힘이 부족한 점을 보완하려는 경향이 있다는 것을 의미한다. 한편 FCR의 기여도는 가장 낮게 나타났으며, 중급 그룹 운동선수들이 이 근육의 힘 전달 효율성을 충분히 활용하지 못했다는 것을 나타냈다. 이러한 차이는 수준별 테니스

선수들이 플랫 스트로크 시 근육 사용 패턴과 기술적 차이가 있다는 것을 알 수 있고, 상급 그룹이 근육 협응성과 힘 전달 효율성에서 더 뛰어난 역량을 보인다는 것을 시사한다.

근육 순간 기여도 분석에서는 포워드 스윙 시작 단계에서 상급 그룹은 주로 ECRB와 SP의 기여도가 더 높게 나타났으며, 기여도는 점차 감소하고 안정화되었다. 이는 스트로크 초기에 ECRB와 SP가 상대적으로 더 많이 참여함을 의미한다. 반면, 중급 그룹은 PT의 기여도가 더 높게 나타났는데, 동작 주기 초반에 가장 높은 기여도를 보이고 이후 점차 감소하며 후반부(80%~100%)에서 안정적으로 유지되었다. 중급 그룹의 전체 근육 기여 패턴은 특정 부분에 집중적으로 나타났으며, 특히 PT의 초기 기여도가 크게 나타났으며, 이는 단일 근육에 대한 의존도가 더 높다는 것을 의미한다. 상급 그룹이 각 단계에서 근육의 분업이 명확한 반면, 중급 그룹은 근육 협응력이 부족해 손목 각도 제어와 스트로크 동작의 안정성이 떨어지는 경향을 보였다. 중급 그룹은 포워드 스윙 초기에 내회전 근육에 지나치게 의존하여 다른 근육들이 충분히 참여하지 못하고, 후반부의 손목 안정성이 부족하다는 경향을 보였다. 이는 서로 다른 수준의 운동선수들이 근육 기여도에서 뚜렷한 차이를 보임을 나타냈다.

손목 각도 변화 시점에서의 근육 활성화 차이를 분석해 본 결과, 손목 각도가 신전에서 굴곡으로 변할 때, 중급 그룹의 FCR의 활성화도가 상급 그룹보다 더 높게 나타났다. 반면, 중급 그룹의 SP의 활성화도는 상급 그룹보다 낮게 나타났다. 이는 상급 그룹이 손목의 신전에서 굴곡으로의 전환 과정에서 여러 근육들의 협응을 통해 안정된 동작을 이끌어낸다는 것을 의미한다. 이는 상급 그룹은 보다 효율적인 근육 협업을 통해 동작을 구현하고, 중급 그룹은 일부 근육에 더 의존하는 경향을 보이며 기술적으로 부족함이 있다는 것을 의미한다. 또한, 외회전에서 내회전으로 전환될 때, 중급 그룹의 FCR활성도가 상급 그룹보다 더 높게 나타났으며, 중급 그룹이 내회전 과정에서 단일 근육에 더 의존하고 있다는 것을 의미한다. 이는 기술 능력과 근육 협응력이 부족함을 시사한다.

본 연구는 수준별 테니스 선수들이 테니스 포핸드 스트로크 시 손목 각도 변화와 전완근 활성화 패턴을 분석함으로써 두 그룹 간의 손목 제어 능력, 근육 간 협응 효율성, 동작 안정성에서의 뚜렷한 차이를 밝혀냈다. 상급 그룹은 더 높은 근육 협응력과 분업이 명확한 활성화 패턴을 보였으며, 특정 근육을 효율적으로 활용하여 힘 전달과 스트로크 정확성을 최적화하였다. 이와 대조적으로, 중급 그룹은 일부 근육의 기여도가 더 높게 나타났는데, 이는 근육 간 협응력과 기술 실행 능력에서 부족함이 있음을 의미한다. 이러한 발견은 테니스 기술 훈련 최적화를 위한 과학적 근거를 제공하는데 그 의의가 있다.

제 6 장 결론 및 제언

제 1 절 결론

본 연구에서는 수준별 테니스 선수들이 포핸드 스트로크 과정에서 나타나는 손목 각도 변화, 전완근 활성화도 및 기여도의 차이를 분석하였고, 손목 각도 변화 시점에서 전완근 활성화도의 차이를 탐구하였다. 이에 도출된 결론은 다음과 같다.

첫째, 상급 그룹은 굴곡/신전 방향에서의 활동 범위(ROM)가 중급 그룹보다 유의하게 작았으며, 중급 그룹은 요측/척측 방향에서의 활동 범위가 상급 그룹보다 유의하게 낮게 나타났다. 전반적으로 두 그룹의 손목 운동 패턴은 비슷한 활동 범위를 보였으나, 중급 그룹은 신전 및 회외전 방향에서 더 큰 활동 범위와 넓은 각도 변화 범위를 보여 더 높은 변이성을 보였다.

둘째, 상급 그룹은 근육 활성화도가 더 빠르게 나타났으며, 특히 30%~60% 구간에서 FCU와 ECRB가 더 정교하게 활성화되었다. 반면, 중급 그룹은 활성화도 시점이 약간 지연되는 경향이 있었고, SP의 활성화도가 40%~100% 구간에서 유의하게 증가하며, 활성화도 패턴은 더 안정적으로 나타났다. 전체 기여도에서 상급 그룹은 FCU의 기여도가 더 높게 나타난 반면, 중급 그룹은 SP의 기여도가 더 높게 나타났다. 순간 기여도에서 포워드 스윙 단계에서 상급 그룹은 주로 ECRB와 SP의 기여도가 높게 나타난 반면, 중급 그룹은 PT의 기여도가 더 높았다. 이처럼 두 그룹은 근육 기여도 패턴에서도 유의한 차이를 보였다.

셋째, 손목이 신전에서 굴곡으로 전환될 때, 중급 그룹은 FCR의 기여도가 더 높게 나타난 반면, 상급 그룹은 SP의 기여도가 더 높게 나타났다. 또한, 손목이 회외전에서 회내전으로 전환될 때, 중급 그룹의 FCR 활성화도가 상급 그룹보다 유의하게 높았다.

이상의 결과는 포핸드 스트로크 과정에서 선수들의 수준에 따라 손목 각도 변화, 전완근 활성화도 및 근육 기여도에서 유의한 차이가 있다는 것을 의미한다. 또한, 상급 그룹이 더 정밀한 근육 제어 능력과 효율적인 운동 패턴을 가지고 있음을 시사한다.

제 2 절 제언

본 연구에는 라켓과 공이 접촉하는 순간의 데이터를 수집하지 못했다는 한계점이 있다. 따라서 공을 타격할 때 손목 각도와 근육 활동에 대한 구체적인 분석을 수행할 수 없고, 이는 스트로크 기술 세부 사항에 대한 포괄적인 이해를 제한할 수 있다. 따라서 후속 연구에서는 타격 순간의 데이터를 수집하여, 결정적인 임팩트를 가하는 시점에서의 손목 각도와 각 근육의 활동 변화에 대해 보다 포괄적으로 평가할 필요가 있다.

참고문헌

- Bahamonde, R., & Knudson, D. (2003). Kinetics of the upper extremity in the open and square stance tennis forehand. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 6(1), 88-101.
- Chadefaux, D., Rao, G., Androuet, P., Berton, E., & Vigouroux, L. (2017). Active tuning of stroke-induced vibrations by tennis players. *Journal of Sports Sciences*, 35(16), 1643-1651.
- Day, S. (2002). Important factors in surface EMG measurement. Bortec Biomedical Ltd Publishers, 1-17.
- Elliott, B., Takahashi, K., & Noffal, G. (1997). The influence of grip position on upper limb contributions to racket head velocity in a tennis forehand. *Journal of Applied Biomechanics*, 13(2), 182-196.
- Fong, D. T.-P., Ha, S. C.-W., Mok, K.-M., Chan, C. W.-L., & Chan, K.-M. (2012). Kinematics analysis of ankle inversion ligamentous sprain injuries in sports: Five cases from televised tennis competitions. *The American Journal of Sports Medicine*, 40(11), 2627-2632.
- Forman, D. A., Forman, G. N., Robathan, J., & Holmes, M. W. (2019). The influence of simultaneous handgrip and wrist force on forearm muscle activity. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 45, 53-60.
- Huang, T., & Gao, J. (2023). A Technical Study of Tennis Forehand Topspin Based on Sports Mechanics. *EAI Endorsed Transactions on Scalable Information Systems*, 10(4), e9-e9.
- Irawadi, H. (2020). The Effect of Backswing, Forwardswing, Contact, and Follow Through on Forehand Drive in Tennis. 942-946.

- Israel, J. S., Loushin, S. R., Tetzloff, S. U., Ellenbecker, T., Kaufman, K. R., & Kakar, S. (2023). Wrist Motion Assessment in Tennis Players using Three-Dimensional Motion Capture and Dynamic Electromyography. *Journal of Wrist Surgery*.
- Karandikar, N., & Vargas, O. O. O. (2011). Kinetic chains: A review of the concept and its clinical applications. *Pm&r*, 3(8), 739-745.
- Ke, L. (2023). Analysis of hitting method and wrist strength of student tennis players. *Revista Brasileira de Medicina Do Esporte*, 29.
- King, M., Hau, A., & Blenkinsop, G. (2017). The effect of ball impact location on racket and forearm joint angle changes for one-handed tennis backhand groundstrokes. *Journal of Sports Sciences*, 35(13), 1231-1238.
- Landlinger, J., Lindinger, S. J., Stöggl, T., Wagner, H., & Müller, E. (2010). Kinematic differences of elite and high-performance tennis players in the cross court and down the line forehand. *Sports Biomechanics*, 9(4), 280-295.
- Li, F., & Liu, L. (2013). Tennis forehand stroke action of biological mechanics analysis. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 5(18), 4590-4593.
- Martin, C., Sorel, A., Touzard, P., Bideau, B., Gaborit, R., DeGroot, H., & Kulpa, R. (2020). Can the open stance forehand increase the risk of hip injuries in tennis players? *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 8(12), 2325967120966297.
- Martin, C., Sorel, A., Touzard, P., Bideau, B., Gaborit, R., DeGroot, H., & Kulpa, R. (2021). Influence of the forehand stance on knee biomechanics: Implications for potential injury risks in tennis players. *Journal of Sports Sciences*, 39(9), 992-1000.
- Morris, M., Jobe, F. W., Perry, J., Pink, M., & Healy, B. S. (1989).

- Electromyographic analysis of elbow function in tennis players. *The American Journal of Sports Medicine*, 17(2), 241-247.
- Naß, D., Hennig, E. M., & Schnabel, G. (1998). Ball impact location on a tennis racket head and its influence on ball speed, arm shock and vibration. *ISBS-Conference Proceedings Archive*.
- Nesbit, S. M., Serrano, M., & Elzinga, M. (2008). The role of knee positioning and range-of-motion on the closed-stance forehand tennis swing. *Journal of Sports Science & Medicine*, 7(1), 114.
- Pedro, B., Cabral, S., & Veloso, A. P. (2021). Concurrent validity of an inertial measurement system in tennis forehand drive. *Journal of Biomechanics*, 121, 110410.
- Pedro, B., João, F., Lara, J. P., Cabral, S., Carvalho, J., & Veloso, A. P. (2022). Evaluation of upper limb joint contribution to racket head speed in elite tennis players using imu sensors: Comparison between the cross-court and inside-out attacking forehand drive. *Sensors*, 22(3), 1283.
- Reid, M., Elliott, B., & Crespo, M. (2013). Mechanics and learning practices associated with the tennis forehand: A review. *Journal of Sports Science & Medicine*, 12(2), 225.
- Rigozzi, C. J., Vio, G. A., & Poronnik, P. (2023). Comparison of grip strength, forearm muscle activity, and shock transmission between the forehand stroke technique of experienced and recreational tennis players using a novel wearable device. *Sensors*, 23(11), 5146.
- Rigozzi, C., Cox, J., Vio, G. A., Martens, W. L., & Poronnik, P. (2022). The effect of spin level and ball exit speed on forearm muscle activity in the tennis forehand stroke. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 17(1), 123-133.
- Seeley, M. K., Funk, M. D., Denning, W. M., & Hager, R. L. (2016).

Tennis forehand kinematics change as post-impact ball speed is altered. In *The Biomechanics of Batting, Swinging, and Hitting* (pp. 181-192). Routledge.

Sniteman, C., & Suzuki, S. (2018). Acute management of common foot and ankle injuries. *Tennis Medicine: A Complete Guide to Evaluation, Treatment, and Rehabilitation*, 449-469.

Tagliafico, A. S., Ameri, P., Michaud, J., Derchi, L. E., Sormani, M. P., & Martinoli, C. (2009). Wrist injuries in nonprofessional tennis players: Relationships with different grips. *The American Journal of Sports Medicine*, 37(4), 760-767.

Tian, Y., He, B., & Tsymbal, A. (2024). Comprehensive secondary prevention of lateral epicondylitis in young tennis players. *Research in Sports Medicine*, 32(1), 160-173.

Abstract

Analysis of Wrist Angle Changes During Forehand Stroke in Tennis Players of Different Skill Levels

Wang Zicen

Department of Physical Education

The Graduate School

Seoul National University

This study aims to explore the differences in wrist angle changes, forearm muscle activation, and contribution during the forehand stroke process between tennis players of different skill levels, and to analyze the differences in forearm muscle activation at the moment of wrist angle change. The study combines motion capture systems and surface electromyography (sEMG) technology, focusing on the three main movement directions of the wrist: flexion/extension, radial/ulnar deviation, and pronation/supination. The target muscles include the Pronator Teres (PT), Flexor Carpi Ulnaris (FCU), Flexor Carpi Radialis (FCR), Extensor Carpi Radialis Brevis (ECRB), and Supinator (SP). By quantifying the activation and contribution of these muscles, the study evaluates the

differences between tennis players of different skill levels. Furthermore, by combining wrist angle change moments with muscle activation, the study aims to reveal subtle differences in muscle activation patterns between high-level and intermediate-level players, providing new perspectives for understanding the relationship between skill level and athletic performance.

For this study, 3 high-level players and 3 intermediate-level players were selected as experimental subjects according to the International Tennis Number (ITN) classification. The forehand stroke test required each participant to complete 5 successful strokes, and motion data were collected synchronously using the Optitrack motion capture system and Delsys surface electromyography (sEMG) system. Forearm movement models were constructed using Visual3D software to analyze wrist joint angles. This experiment was approved by the Institutional Review Board of Seoul National University (IRB No. 2409/004-003).

Data processing was carried out using the Windows SPSS 27.0 statistical program, with a statistical significance level set at $P \leq 0.05$.

The results of this study are as follows:

First, the high-level group had a significantly smaller range of motion (ROM) in the flexion/extension direction compared to the intermediate-level group, while the intermediate-level group had a significantly smaller range of motion in the radial/ulnar deviation direction compared to the high-level group. Overall, both groups showed similar wrist movement patterns with comparable ranges, but the intermediate-level group exhibited larger ranges of motion and wider angle variations in the extension and external rotation directions, showing greater variability.

Second, in terms of activation: The high-level group showed faster muscle activation, especially with more precise activation of EMG2:FCU

and EMG4:ECRB in the 30%-60% range. In contrast, the intermediate-level group showed slightly delayed activation, with a significant increase in the activation of EMG5:SP in the 40%-100% range, and their activation pattern was more uniform. Regarding overall contribution: The high-level group relied more on EMG2:FCU, while the intermediate-level group relied more on EMG5:SP. For momentary contribution: During the forward swing phase, the high-level group mainly relied on EMG4:ECRB and EMG5:SP, while the intermediate-level group relied more on EMG1:PT. Significant differences were observed in the muscle contribution patterns between the two groups.

Third, when the wrist angle transitions from extension to flexion, the activation of EMG3:FCR in the intermediate-level group was higher than that in the high-level group. On the other hand, the activation of EMG5:SP in the intermediate-level group was lower than in the high-level group. Additionally, the activation of EMG3:FCR in the intermediate-level group was significantly higher than that of the high-level group.

This study, by understanding the differences in wrist angle changes and muscle activation between the high-level and intermediate-level groups, can help coaches optimize training more effectively, improve athletes' motor control and muscle coordination abilities, and enhance their performance in hitting strokes.

Keywords: Tennis forehand stroke, wrist angle, forearm muscles, activation, contribution.

Student Number: 2022-24722