

열린사슬과 닫힌사슬 동작 시 무릎관절의 굽힘 각도와 근수축 형태에 따른 가쪽넓은근과 안쪽빗넓은근 활성화 분석

Analysis of Muscular Activity in Vastus Medialis Oblique and Vastus Lateralis depending on Types of Kinetic Chain Exercise and Muscle Contraction

이건우(부경대학교 석사) · 김태규*(부경대학교 교수)

Gun-Woo Lee *Pukyong National University* · Taegyu Kim *Pukyong National University*

요약

본 연구는 다양한 저항훈련 동작에 익숙한 20대 남녀 보디빌딩 선수를 대상으로 열린사슬 운동인 레그익스텐션과 닫힌사슬 운동인 바벨스쿼트를 수행하는 동안 근수축형태에 따른 안쪽넓은근(vastus medialis oblique, VMO)과 가쪽넓은근(vastus lateralis, VL)의 근활성도를 확인하고 이를 비교하는 것을 목적으로 하였다. 건강한 20대 남녀 보디빌딩선수 총 38명(남자 31명, 여자 7명)을 대상으로 30RM(Repetition Maximum) 무게로 바벨스쿼트와 레그익스텐션을 각각 5회씩 실시하도록 교육하였고, 각 동작에 대해 허벅지와 아랫다리의 사잇각을 기준으로 45° ECC(eccentric contraction, 180° 에서 135° 까지), 90° ECC(135° 에서 90° 까지), 90° CON(concentric contraction, 90° 에서 135° 까지) 및 45° CON(135° 에서 180° 까지)의 구간을 설정하였다. 각 구간에 대해 VMO와 VL의 근활성도(%MVIC)를 각각 확인하였고, VL에 대한 VMO의 비율을 산출하였다. 그 결과, 바벨스쿼트 동작 중 VMO와 VL의 근활성도는 90° CON 구간에서 가장 높게 확인된 반면, 레그익스텐션 동작 중에서는 45° CON 구간에서 가장 높은 것으로 확인되었고, 우세측과 비우세측의 VMO와 VL 모두 바벨스쿼트 동작의 90° ECC와 90° CON 구간에서 레그익스텐션 동작보다 높은 활성도를 보였으며, VL에 대한 VMO 비율은 우세측만 바벨스쿼트 동작의 90° CON 구간에서 레그익스텐션 동작보다 높은 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 VMO 활성화 및 VL에 대한 VMO 비율 향상을 통한 무릎관절 부상예방 및 안정성을 향상하기 위한 운동프로그램을 개발하는 데에 유용한 정보로 활용될 수 있을 것이다.

Abstract

This study aimed to verify the activity of vastus medialis oblique(VMO) and vastus lateralis(VL) depending on the types of muscle contraction during the barbell squat and leg extension. A total 38 healthy bodybuilders(31 males, 7 females) used to the resistance exercises were participated in this study, and they were instructed to do the barbell squat and leg extension using their 30RM. Both barbell squat and leg extension were divided into 4 phases based on the intersection angle between thigh and lower leg: 45° ECC(eccentric contraction, from 180° to 135°), 90° ECC(from 135° to 90°), 90° CON(concentric contraction, from 90° to 135°), and 45° CON(from 135° to 180°). The muscle activity was recorded for the VMO and VL and expressed relative to the maximal voluntary isometric contraction(%MVIC). the VMO and VL and expressed relative to the maximal voluntary isometric contraction(%MVIC). Also, the ratio of VMO to VL was calculated. The results indicated that during the barbell squat and leg extension the activities of VMO and VL were the highest in 90° CON and 45° CON, respectively. In the 90° ECC and 90° CON, both VMO and VL activities were higher during the barbell squat compared to the leg extension, and the ratio of VMO to VL in dominant leg was higher in 90° CON during the barbell squat compared to the leg extension. These results could provide useful information on the prevention of knee injury and the enhancement of stability of knee joint via the muscle strength in lower extremities.

Key words : Patellofemoral joint, Muscle activity, Kinetic chain exercise

I. 서론

무릎뼈다리관절(슬개대퇴관절, patellofemoral joint)의 기능(function)과 안정성(stability)은 뼈 또는 연골의 형태와 함께 근육과 같은 능동 안정자(active stabilizers)와 인대와 같은 수동 안정자(passive stabilizers)의 복잡한 상호작용으로 인해 유지된다(Dong et al., 2021). 능동 안정자 중 하나인 안쪽넓은근(내측광근, vastus medialis, VM)은 무릎뼈다리관절의 안정성에 매우 중요한 역할을 하는 것으로 보고되었는데(Jan et al., 2009), 특히 안쪽넓은근(내측광근의 빗섬유, vastus medialis oblique, VMO)은 무릎뼈의 수직 정렬 축에서 50° 정도 사선으로 안쪽넓은근의 원위부에 붙어 있는 근섬유로, 가쪽넓은근(외측광근, vastus lateralis, VL)의 수축으로 인해 무릎뼈가 외측으로 당겨지는 힘을 부분적으로 상쇄하는 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Dong et al., 2021). 이러한 안쪽넓은근(VMO)의 약화는 0-15°의 무릎 굽힘에서 무릎뼈를 가쪽으로 이동하게 하고 이는 무릎뼈의 불안정성, 무릎뼈다리 통증 증후군(patellofemoral pain syndrome, PFPS)과 같은 무릎관절 질환과 관련성이 높은 것으로 보고되었다(Mohr, Kvitne, Pink, Fidler & Perry., 2003).

저항운동은 근육량을 증가시키고 근력을 향상시켜 최적의 신체 상태(condition)를 유지하는 방법으로, 운동선수들에게는 운동수행 능력을 높이고 부상을 예방하는 데에 중요한 역할을 하는 훈련방법이다(Muyor, Martín, Rodríguez & Antequera., 2020). 안쪽넓은근(VM)과 가쪽넓은근(VL)을 포함한 넓다리네갈래근(대퇴사두근, quadriceps femoris)의 대표적인 저항운동 방법으로 레그익스텐션(leg extension)과 스쿼트(squat)가 있는데, 레그익스텐션은 대표적인 열린사슬(open kinetic chain) 운동으로 체중부하 없는 상태에서 먼쪽부위(원위부) 분절이 자유롭게 움직여 하나의 관절(single joint)에만 움직임이 발생하므로 관절가동범위가 제한된 사람에게 선택적으로 근육을 강화하기 위해 일반적으로 사용하는 방법이다(Escamilla., et al., 1998; Irish, Millward, Wride, Haas & Shum., 2010). 이에 반해 스쿼트는 닫힌사슬(closed kinetic chain) 운동으로 체중부하 상태로 엉덩관절과 무릎관절 및 발목관절에서 동시에 움직임이 발생하게 되는데(Stensdotter, Hodges, Mellor, Sundelin & Häger., 2003), 스쿼트의 어센딩(ascending)과 디센딩(descending) 동안 불기근(둔근, gluteal muscle)과 허벅지 근육이 강하게 활성화되고 이와 동시에 상체를 안정시키는 허리 근육도 활성화되므로 전신 운동일 수 있다고 설명된다(Slater & Hart., 2017). 선행연구에서는 스쿼트와 같은 닫힌사슬 운동 자체가 다관절의 고유수용 반응(proprioceptive reaction)과 동시수축(co-contraction)이 이루어지므로, 열린사슬 운동보다 더 기능적인 중재로 제안되었고(Tang et al., 2001), 스쿼트의 60° 무릎관절 굽힘 위치에서 VMO 활성도가 가장 높은 동시에 VMO:VL이 1보다 큰 것으로 확인되었다(Hertel, Earl, Tsang & Miller., 2004). 그러나 최근 연구에서는 열린사슬 운동이 임상적인(clinical) 상황에서 더 적절한 치료 방법일 수도 있다고 설명하는데(Irish et al., 2010), 레그익스텐션의 VMO는 60-90° 무릎관절 굽힘에서 가장 활성화된다고 하였다(Brownstein, Lamb &

Mangine., 1985). 이렇듯 VMO 활성화 또는 VMO:VL을 향상시키기 위해 임상에서는 두 가지 유형의 운동 모두 광범위하게 사용되고 있다.

근수축은 단축성(concentric) 수축과 신장성(eccentric) 수축으로 특징지을 수 있는데, 단축성 수축은 근육이 외부 부하보다 큰 장력을 발생하여 근육이 수축하면서 짧아지는 수축을 말하는 반면, 신장성 수축은 근육이 늘어나면서 외부 부하의 작용에 저항하는 수축을 말한다(Mike, 2015). 2가지의 근수축 형태를 비교할 때, 신장성 수축이 단축성 수축보다 20-60% 정도 큰 힘을 생성할 수 있다고 보고되었고(Hollander, et al., 2007), 선행연구에서는 같은 부하를 적용할 수 있다고 가정한다면 신장성 수축이 근력증가나 근비대(hypertrophy)를 더 촉진할 수도 있다고 언급하였다(Schoenfeld, 2012). 또한, 신장성 수축은 무릎관절 손상이 있는 운동선수의 통증 완화와 기능 개선을 위한 재활프로그램을 구성하는 주요 요소이나, 운동수행의 표준방법에 대해서는 많은 선행연구에서 일치하지 못한 결과를 보이고 있으며(Acaröz, Sözen & Arı., 2021), 일부 연구에서는 근수축 형태에 따른 VMO와 VL 활성도는 차이를 보이지 않는다고 주장되기도 하였다(Souza & Gross., 1991).

운동사슬과 근수축 형태에 따른 VMO와 VL 활성도 및 VL에 대한 VMO의 비율 차이를 확인한 연구는 주로 PFPS, 전방십자인대(anterior cruciate ligament) 손상과 같은 무릎관절 질환을 가진 환자를 대상(Kvist & Gillquist., 2001; Tang, et al., 2001)으로 수행되어 재활적 관점에서 정보를 제공하지만, 하지근육을 활성화하기 위한 운동은 엉덩관절의 위치나 자세의 변화에 따라 활성도에 차이를 보일 수 있으므로(Wallace, Salem, Salinas & Powers., 2002), 저항운동에 대한 비숙련도를 통제하여 운동사슬과 근수축 형태에 따른 운동효과를 비교분석할 필요가 있을 것으로 생각된다. 따라서, 본 연구에서는 다양한 저항훈련 동작에 익숙한 20대 남녀 보디빌딩 선수를 대상으로 열린사슬 운동인 레그익스텐션과 닫힌사슬 운동인 바벨스쿼트를 수행하는 동안 근수축형태에 따른 VMO와 VL의 근활성도를 확인하고 이를 비교함으로써, 하지 근육 활성도 향상을 통한 무릎대퇴관절 부상예방 및 안정성 확보를 위한 운동수행 전략을 마련하는 데에 유용한 정보를 제공하고자 한다.

II. 연구방법

1. 연구 대상

본 연구는 대한보디빌딩협회에 등록된 선수 중 전국대회 및 시도대회 출전 경험이 있는 건강한 20대 남녀 보디빌딩 선수를 대상으로 본 연구의 목적과 절차에 대해 자세한 설명을 들은 후 자발적인 연구참여에 동의한 38명을 선정하였다(표 1). 최근 2년 이내에 근골격계 질환으로 인한 치료 및 재활을 받았거나 운동 시 허리나 하지에 통증이 있는 선수는 제외하였고, 모든 연구절차에 대해서는 P대학의 생명윤리위원회로부터 승인을 받았다(IRB 승인번호: 1041386-201905-HR -15-01).

표 1. 연구대상자의 신체적 특성

성별 (n,%)		나이 (yrs.)	키 (cm)	몸무게 (kg)	우세측 (n,%)	
남	여				오른	왼
31 (81.6)	7 (18.4)	24.39 ±3.68	178.89 ±33.85	74.73 ±11.96	36 (94.7)	2 (5.3)

Values are presented as mean±standard deviation or frequency (%).

2. 측정방법

모든 실험은 B광역시 소재 체력단련장에서 진행되었고, 실험 전 인구통계학적인 특성 조사와 신장 및 체중 측정 후 충분한 준비운동을 통해 연구대상자가 실험환경에 적응할 수 있도록 하였다. 개별적인 준비운동이 종료된 후, 선수 개개인의 바벨스쿼트와 레그익스텐션에 대한 1RM을 각각 측정하였고, 가쪽넓은근과 안쪽넓은근에 대한 최대 수의적 등척성 수축력(Maximal Voluntary Isometric Contraction, MVIC) 측정 후, 30RM 무게로 단한사슬 동작인 바벨스쿼트와 열린사슬 동작인 레그익스텐션을 각각 5회씩 실시하여 자료를 수집하였다.

1) 1RM(repetition maximum) 측정

1RM 측정은 Brzycki(1993)이 제안한 공식을 사용하여 간접적으로 측정하였다. 우선 연구대상자가 들어 올릴 수 있는 중량을 제 공하여 바벨스쿼트와 레그익스텐션을 수행하도록 교육하였고, 반복횟수를 확인하였다. 우세측을 먼저 측정한 후 비우세측을 측정하였고, 반복횟수가 5회 미만이거나 10회 이상 수행할 경우 동작을 중단하였으며, 30분 휴식 후 중량부하를 조정하여 재측정하였다. 1RM 간접 추정식은 다음과 같다: $1RM = \text{들어 올린 중량} \times \text{반복한 횟수} \times 0.025$.

2) 근전도 측정

바벨스쿼트와 레그익스텐션 시 안쪽넓은근(VMO)과 가쪽넓은근(VL)의 근활성도를 측정하기 위해 4채널 무선 표면근전도 시스템(Telemyo mini DTS, Noraxon Inc., USA)을 사용하였다. 우선, 전극과 피부 사이의 저항을 최소화하기 위해 전극부착부위를 면도칼로 털을 제거하고 의료용 알코올 솜으로 닦은 후, 10mm 직경의 전도성 영역이 있는 접착성 전극을 20mm 거리를 두어 각 근육에 부착하였다. 안쪽넓은근(VMO)은 앞위엉덩뼈가시(ASIS)와 무릎뼈(patella) 안쪽을 이은 선의 4/5지점에 전극을 부착하였고, 가쪽넓은근(VL)의 경우, 앞위엉덩뼈가시(anterior superior iliac spine, ASIS)와 무릎뼈(patella) 가쪽을 이은 선의 2/3지점에 전극을 부착하였다(Hermens, Freriks, Disselhorst-Klug & Rau., 2000).

수집된 표면근전도 신호는 디지털신호로 전환되어 개인용 컴퓨터의 Myoresearch XP 1.08 software(Noraxon Ins, USA)를 통해 RMS(root mean square)방법으로 처리되었다. 근전도 신호의 표본추출률(sampling rate)은 1500Hz로 설정하였고, 주파수 대역폭(bandpass-filtered)은 40-250Hz를 사용하였으며, 노치필터(notch filter)

는 60Hz를 사용하였다.

3) 최대 수의적 등척성 수축력(MMC) 측정

수집된 근전도값을 표준화하기 위해 최대 수의적 등척성 수축력(MVIC)에 대한 상대적 비율(%MVIC)을 산출하였다(Kendall, McCreary, Provance, Rodgers & Romani., 2005). 안쪽넓은근(VMO)과 가쪽넓은근(VL)의 최대 수의적 등척성 수축력(MVIC) 측정을 위해, 연구대상자는 테이블 위에 엉덩관절을 90° 굽힌 상태로 앉아 넙다리뼈를 벨트로 고정한 후 무릎관절이 80° 굽힘 위치에서 폼을 하도록 교육받았다(Newman, Jones & Newham., 2003). 검사자는 연구대상자의 발목관절에 도수저항을 가하여 등척성 수축이 5초간 발생하도록 하였고(그림 1) 처음과 마지막 1초를 제외한 3초간의 자료를 수집하였다. 우세측을 먼저 측정한 후 비우세측을 측정하였고, 3회 측정한 값 중 평균값을 사용하였으며, 근피로도에 대한 오류를 최소화하기 위해 측정간 2분의 휴식을 취하도록 하였다.

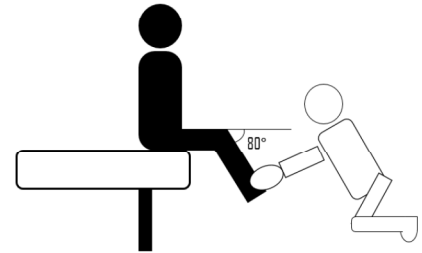


그림 1. MMC 측정방법

4) 근전도 분석구간

근전도 분석구간의 정확한 설정을 위해, 1대의 고속카메라(NEX-FS700, SONY Tokyo, Japan)를 연구대상자가 동작을 수행하는 지점의 좌측 4m 거리에 지면으로부터 85cm의 높이로 설치하여 영상을 수집하였다. 영상과 근전도 자료의 동조를 위해 동기기기(Visol, Korea)를 사용하였고, 동작을 수행할 때 동기기기의 스위치를 눌러 고속카메라를 통해 기록된 발광다이오드 영상과 근전도 데이터에 기록된 신호를 활용하여 동조화하였다. 모든 연구대상자는 검정색 타이즈를 착용한 후, 넙다리뼈(femur)의 큰돌기(great trochanter)와 가쪽관절융기(lateral condyle) 및 가쪽복사뼈(lateral malleolus)에 노란색 스티커를 부착하여 바벨스쿼트와 레그익스텐션을 각각 수행하였고, 수집된 영상은 Dartfish™ Team Pro Software 6.0(Dartfish USA Inc., Alpharetta, Georgia, USA)를 사용하여 노란 스티커를 연결한 선의 사잇각이 135° (무릎관절의 45° 굽힘)의 시점을 확인하였다.

넙다리뼈와 아래다리의 사잇각이 180° 인 시점에서 시작하여 90° 가 될 때까지 움직이는 과정 중 무릎굽힘 180° 부터 135° 까지를 45° 신장성(eccentric) 수축(45° ECC)으로 정의하였고, 무릎굽힘 135° 부터 90° 까지를 90° 신장성 수축(90° ECC), 무릎굽힘 90° 부터 135° 까지를 90° 단축성(concentric) 수축(90° CON), 그리

고 무릎굽힘 135° 부터 180° 까지를 45° 단축성 수축(45° CON)으로 정의하였다. 각 구간에 대해 안쪽빗넓은근(VMO)과 가쪽넓은근(VL)의 근활성도 및 가쪽넓은근(VL)에 대한 안쪽빗넓은근(VMO) 비율을 각각 확인하였다.

5) 동작수행방법

본 실험 전, 선수 개개인의 바벨스쿼트와 레그익스텐션 동작에 대해 사전평가를 실시하여 동일한 동작이 발생할 수 있도록 2주간 6회 교정을 실시하였고, 실험 시작 전 동작을 5회씩 실시한 다음 30분간 휴식 후 본 실험을 진행하였으며, 동작수행 간 2분의 휴식을 취하도록 교육하였다. 각 동작에 대한 중량은 30RM으로 설정하여 안정된 자세를 지속적으로 유지할 수 있도록 하였고, 근활성도에 영향을 미칠 수 있는 각속도 또는 수축속도를 통제하고자 (Lawrence, Braman, LaPrade & Ludewig., 2014) 메트로놈을 사용하여 연구대상자의 동작수행 속도를 유지하도록 교육하였다.

단한사슬 동작인 바벨스쿼트 수행 시, 양발을 어깨너비만큼 벌린 자세에서 바벨을 상부 등세모근(상부 승모근, upper trapezius)에 얹어 팔꿈관절이 90° 굽힘이 되도록 바를 잡고 시선은 전방을 향한 상태를 취하도록 교육한 후, 허벅지가 무릎과 수평이 될 때까지 앉도록 요청하였다. 앉을 때는 무릎이 발끝 앞으로 나오지 않도록 하고 일어날 때는 발뒤꿈치로 허벅지를 밀어 올리듯 일어나도록 교육하였다.

열린사슬 동작인 레그익스텐션 수행 시, 연구대상자는 레그익스텐션 기구에 앉아 무릎관절의 회전축과 기구의 축이 일치하도록 등받이와 의자를 조절하였고, 발목패드 는 복사뼈에서 위쪽으로 약 10cm 지점에 위치하도록 조절하였다. 불필요한 동작을 방지하고 다른 근육군의 관여를 최소화하기 위해 상체 움직임이 없도록 교육하였다.

3. 자료처리방법

바벨스쿼트와 레그익스텐션 동작 수행 시, 분석시점에서의 안쪽빗넓은근(VMO)과 가쪽넓은근(VL)근활성도 및 VL에 대한 VMO 비율(VMO:VL) 차이를 확인하기 위해 대응표본 t-검정(paired t-test)을 실시하였고, 각 동작에 따라 VMO와 VL의 근활성도와 VMO:VL 변화를 확인하기 위해 반복측정분산분석(repeated measure analysis of variables, RMANOVA)를 실시하였으며, 최소유의차(Least Significant Difference, LSD) 검정을 통해 사후검정(post hoc)을 실시하였다. 측정된 모든 자료는 SPSS 21.0 for Window 통계 프로그램을 사용하여 분석하였고, 모든 통계적 유의수준은 $\alpha=.05$ 로 설정하였다.

III. 연구결과

1. 바벨스쿼트 동작과 레그익스텐션 동작 시 우세측 안쪽빗넓은근(VMO)과 가쪽넓은근(VL)의 근활성도

우세측 VMO의 경우, 바벨스쿼트 동작 시 무릎관절의 90° ECC와 90° CON의 근활성도(각각 $39.02\pm22.67\%$ MVIC와 $51.35\pm31.54\%$ MVIC)는 레그익스텐션동작($15.53\pm7.81\%$ MVIC과 $21.73\pm10.06\%$ MVIC)보다 높았고(각각 $t=8.437, p=.001$ 와 $t=7.524, p=.001$), VL 또한 바벨스쿼트 동작(각각 $38.33\pm19.44\%$ MVIC와 $49.18\pm25.66\%$ MVIC)이 레그익스텐션 동작(각각 $16.95\pm9.12\%$ MVIC와 $24.75\pm12.28\%$ MVIC)보다 높은 것으로 확인되었다(각각 $t=8.543, p=.001$ 와 $t=7.877, p=.001$). VMO:VL은 바벨스쿼트 동작 중 무릎관절의 90° CON(1.03 ± 0.25) 구간보다 레그익스텐션 동작(0.92 ± 0.28)에서 높은 것으로 확인되었다($t=2.294, p=.028$). 바벨스쿼트 동작에서 VMO와 VL의 근활성도는 무릎관절의 90° CON에서 가장 높은 것으로 확인된 반면(각각 $F=63.659, p=.001$ 와 $F=72.552, p=.001$), 레그익스텐션 동작에서는 무릎관절의 45° CON에서 가장 높은 것으로 확인되었다(각각 $F=31.928, p=.001$ 와 $F=18.657, p=.001$; 표 2).

표 2. 바벨스쿼트 동작과 레그익스텐션 동작 시 우세측 안쪽빗넓은근(VMO)과 가쪽넓은근(VL)의 근활성도

		45° ECCa	90° ECCb	90° CONc	45° CONd	F (p)	Post-hoc
안쪽빗넓은근 (%MVIC)	바벨스쿼트	19.82±12.07	39.02±22.67	51.35±31.54	23.36±16.20	63.659 (.001)	c)b)d)a
	레그익스텐션	18.71±8.83	15.53±7.81	21.73±10.06	26.61±15.28	31.928 (.001)	d)c)a)b
	t (p)	0.841 (.406)	8.437 (.001)	7.524 (.001)	-1.468 (.151)		
가쪽넓은근 (%MVIC)	바벨스쿼트	21.58±12.30	38.33±19.44	49.18±25.66	25.61±12.24	72.552 (.001)	c)b)d)a
	레그익스텐션	20.72±9.14	16.95±9.12	24.75±12.28	33.09±23.72	18.657 (.001)	d)c)a)b
	t (p)	0.461 (.648)	8.543 (.001)	7.877 (.001)	-1.936 (.060)		
VL에 대한 VMO의 비율	바벨스쿼트	0.99±0.43	1.02±0.28	1.03±0.25	0.90±0.35	2.351 (.097)	-
	레그익스텐션	0.94±0.33	0.98±0.39	0.92±0.28	0.88±0.29	1.571 (.208)	-
	t (p)	0.698 (.490)	0.715 (.479)	2.294 (.028)	0.368 (.715)		

ECC: eccentric contraction, CON: concentric contraction
 45° ECC: 무릎굽힘 180°부터 135°까지, 90° ECC: 무릎굽힘 135°부터 90°까지, 90° CON: 무릎굽힘 90°부터 135°까지, 45° CON: 무릎굽힘 135°부터 180°까지

2. 바벨스쿼트 동작과 레그익스텐션 동작 시 비우세측 안쪽넓은근(VMO)과 가쪽넓은근(VL)의 근활성도

비우세측 VMO의 경우, 바벨스쿼트 동작(각각 $37.93 \pm 21.81\%$ MVIC와 $52.33 \pm 30.45\%$ MVIC)이 레그익스텐션($15.16 \pm 6.49\%$ MVIC과 $22.83 \pm 11.98\%$ MVIC) 동작보다 높았고(각각 $t=7.516$, $p=.001$ 와 $t=7.191$, $p=.001$), VL 또한 바벨스쿼트 동작 시 무릎관절의 90° ECC와 90° CON의 근활성도(각각 $40.09 \pm 19.00\%$ MVIC와 $54.15 \pm 29.13\%$ MVIC)는 레그익스텐션 동작(각각 $17.62 \pm 7.45\%$ MVIC와 $26.64 \pm 11.88\%$ MVIC)보다 높은 것으로 확인되었다(각각 $t=9.212$, $p=.001$ 와 $t=7.104$, $p=.001$). 바벨스쿼트 동작에서 VMO의 근활성도는 무릎관절의 90° CON에서 가장 높은 것으로 확인된 반면 ($F=68.032$, $p=.001$), 레그익스텐션 동작에서는 VMO와 VL의 근활성도 모두 무릎관절의 45° CON에서 가장 높은 것으로 확인되었다(각각 $F=33.372$, $p=.001$ 와 $F=56.324$, $p=.001$). 45° CON의 VMO:VL은 45° ECC와 90° ECC 및 90° CON보다 낮은 것으로 확인되었다($F=6.408$, $p=.001$).

IV. 논의

본 연구는 운동의 비숙련도를 통제하기 위해 저항훈련에 익숙한 38명의 건강한 보디빌딩 선수를 대상으로 운동사슬과 근수축형태에 따른 안쪽넓은근(VMO)과 가쪽넓은근(VL)의 근활성도 차이를 비교분석하였다. 그 결과, 바벨스쿼트 동작 중 VMO와 VL의 근활성도는 90° CON 구간에서 가장 높게 확인된 반면, 레그익스텐션 동작 중에서는 45° CON 구간에서 가장 높은 것으로 확인되었고, 우세측과 비우세측의 VMO와 VL 모두 바벨스쿼트 동작의 90° ECC와 90° CON 구간에서 레그익스텐션 동작보다 높은 활성도를 보였으며, VL에 대한 VMO 비율은 우세측만 바벨스쿼트 동작의 90° CON 구간에서 레그익스텐션 동작보다 높은 것으로 확인되었다.

앞서 언급한 바와 같이, 무릎관절 안쪽면의 동적 안정자 역할을 하는 안쪽넓은근(VMO)은 무릎뼈와 넙다리뼈가 이루고 있는 관

절인 무릎넙다리관절(patellofemoral joint)의 안정성에도 중요한 역할을 하는데, 이는 VMO가 무릎뼈의 수직축에서 약 50° 정도 사선으로 안쪽넓은근의 위위부에 붙어 있으며 또한 안쪽 무릎넙다리인대(medial patellofemoral ligament)와도 강하게 맞물려 있는 구조적인 원인에 의한 것이라 할 수 있을 것이다(Dong et al., 2021). PFPS가 있는 환자를 대상으로 VMO와 VL의 단면적을 확인한 연구에서는 VMO와 VL 모두 위축(atrophy)되어 있는 것이 나타났고, 위축정도는 VMO가 VL보다 더 심한 것으로 확인하였다(Dong et al., 2021). 이러한 PFPS 환자에게 VMO를 강화하는 훈련은 통증완화와 무릎관절 기능향상에 효과적이라고 언급되었으며(Hodges & Richardson., 1993), 무릎뼈 정렬과 안정성을 위한 전략이라고 설명하고 있다(Chang, Huang, Lee, Lin, & Lai., 2014). VMO와 VL 등 넙다리네갈래근 근력강화를 위한 재활프로그램에는 열린사슬 운동과 닫힌사슬 운동 모두 포함되어 있는데(Felicio, de Carvalho, Dias, Vigário, 2019), 닫힌사슬 운동인 스쿼트에 비해 열린사슬 운동인 레그익스텐션을 수행할 때 넙다리네갈래근 근활성도가 45%정도 증가한다고 보고되었으며(Escamilla et al., 1998), 열린사슬 운동 후 넙다리네갈래근 중 중간넓은근(vastus intermedius)의 두께(thickness)가 가장 두꺼워진 반면, 닫힌사슬 운동 후에는 VMO의 근 두께가 가장 두꺼워진 것으로 확인되었다(Cheon, Lee, Jun, An & Chang., 2020). 본 연구에서도 우세측과 비우세측 모두 닫힌사슬 운동인 바벨스쿼트의 어센딩(무릎관절 90° 시점에서 135° 시점까지)과 디센딩(무릎관절 135° 시점에서 90° 시점까지) 90° 무릎굽힘 구간에서 VMO의 활성도는 열린사슬 운동인 레그익스텐션의 동일한 구간보다 높은 것으로 나타나 선행연구와 유사한 결과를 보였다. 그러나, 한 연구(Kettunen, Visuri, Harilainen, Sandelin & Kujala., 2005)에서는 스쿼트 시 무릎굽힘이 $0^\circ - 60^\circ$ 범위에서 VMO 활성화가 가장 높다고 하였으나, 다른 연구(Vecchio, Daewoud & Green., 2018)에서는 90° 무릎굽힘 각도에서 VMO는 더 활성화되고 무릎굽힘 각도를 더 증가할수록 VL에 비해 VMO 활성도가 증가한다고 설명하였으며, 본 연구도 바벨스쿼트에서 VMO의 활성도는 어센딩 시 90°

표 3. 바벨스쿼트 동작과 레그익스텐션 동작 시 비우세측 안쪽넓은근(VMO)과 가쪽넓은근(VL)의 근활성도

		45° ECCa	90° ECCb	90° CONc	45° CONd	F (p)	Post-hoc
안쪽넓은근 (%MVIC)	바벨스쿼트	19.33±11.09	37.93±21.81	52.33±30.45	22.15±12.71	68.032 (.001)	c)b>d)a
	레그익스텐션	18.31±7.92	15.16±6.49	22.83±11.98	25.36±12.18	33.372 (.001)	d)c>a)b
	t (p)	0.737 (.466)	7.516 (.001)	7.191 (.001)	-1.513 (.139)		
가쪽넓은근 (%MVIC)	바벨스쿼트	21.47±10.64	40.09±19.00	54.15±29.13	42.44±84.17	3.621 (.060)	-
	레그익스텐션	21.57±8.78	17.62±7.45	26.64±11.88	31.71±12.69	56.324 (.001)	d)c>a)b
	t (p)	-0.062 (.951)	9.212 (.001)	7.104 (.001)	0.769 (.447)		
VL에 대한 VMO의 비율	바벨스쿼트	0.94±0.40	0.95±0.25	0.96±0.24	0.78±0.31	6.408 (.001)	a,b,c>d
	레그익스텐션	0.88±0.27	0.91±0.33	0.88±0.27	0.82±0.28	2.077 (.107)	-
	t (p)	1.262 (.215)	0.682 (.499)	1.626 (.112)	-1.017 (.316)		

ECC: eccentric contraction, CON: concentric contraction

45° ECC: 무릎굽힘 180° 부터 135° 까지, 90° ECC: 무릎굽힘 135° 부터 90° 까지, 90° CON: 무릎굽힘 90° 부터 135° 까지, 45° CON: 무릎굽힘 135° 부터 180° 까지

무릎굽힘 구간(무릎관절 90° 시점에서 135° 시점까지)에서 가장 높은 것으로 확인되었다. 이러한 VMO 활성화와 관련된 선행연구 결과의 불일치는 스쿼트의 숙련도, 깊이(depth), 발 위치(foot position) 등에 따라 넵다리네갈래근 활성화도에 차이가 있다는 연구 결과(Wallace et al., 2002)와 관련이 있을 것으로 생각된다. 따라서, 추후 연구에서는 본 연구와 같이 바벨스쿼트에 익숙한 연구대상자를 대상으로 발 위치 또는 스쿼트 깊이에 따른 하지 근육 근활성도를 비교분석한다면 하지 근육을 강화하는 운동 동작에 대해 더 의미 있는 정보를 제공할 수 있을 것으로 생각된다.

가쪽넓은근(VL)은 하지 근력과 파워를 평가하기 위해 흔히 활용되는 근육 중 하나(Varanoske et al., 2019), 실제 VL의 두께는 백스쿼트(back squat)의 1RM 및 스쿼트 점프와 매우 강한 상관관계를 보이는 것으로 알려져 있다 (Kojic, Đurić, Ranisavljev, Stojiljkovic & Ilic., 2021). 건강한 남성을 대상으로 8주간 신장성 저항운동과 단축성 저항운동을 실시한 결과, 신장성 저항운동 후 VL의 두께가 유의하게 증가한 것으로 확인되어 단축성 저항운동보다 신장성 저항운동이 약간의 이점이 있다고 제안되었다(Büker, Şavkin, Süzer & Akkaya., 2021). 또한, 단한사슬 운동에서는 넵다리네갈래근이 동시에 수축하는 반면, 열린사슬 운동에서는 넵다리곧은근(rectus femoris)이 먼저 수축하고 VL과 중간넓은근(vastus intermedius)이 수축하며 마지막으로 VMO가 수축하는 것으로 보고되었고(Stensdotter et al., 2003), 무릎굽힘이 0-30° 범주에 있을 때보다 60-90° 범주일 때 VL의 활성도가 약 10배가량 증가한다고 보고하였다(Acaröz et al., 2021). 본 연구에서도 본 연구에서도 우세측과 비우세측은 단한사슬 운동인 바벨스쿼트의 어센딩(무릎관절 90° 시점에서 135° 시점까지) 또는 디센딩(무릎관절 135° 시점에서 90° 시점까지) 90° 무릎굽힘 구간에서 VL의 활성도는 열린사슬 운동인 레그익스텐션의 동일한 구간보다 높은 것으로 나타났고, 바벨스쿼트에서 VL의 활성도는 어센딩 시 90° 무릎굽힘 구간(무릎관절 90° 시점에서 135° 시점까지)에서 가장 높은 것으로 확인되어 선행연구와 유사한 연구결과를 보였다. 한 선행연구에서는 스쿼트가 수행되는 지면의 각도, 즉 디클라인 앵글(decline angle)에 따라 VL의 근활성도에 차이가 있다고 설명하였는데, 특히 디클라인 앵글이 20° 일 때 VL의 활성도가 가장 높다고 언급하고 있으며(Acaröz et al., 2021), 추후 연구에서는 디클라인 앵글도 고려해야 할 필요가 있을 것으로 생각된다.

무릎관절 펌 또는 굽힘 시 안쪽넓은근(VMO)과 가쪽넓은근(VL)은 도르래고랑(휠차구, trochlear groove)에서의 무릎뼈 주행(tracking)을 조절하는데, VMO와 VL의 불균형은 무릎뼈 부정렬을 유발하고 가쪽 벡터(vector)를 증가시켜 무릎넵다리 관절의 압력을 증가시킨다(Chen, Chang, Wu & Fong., 2018). 건강한 성인의 경우 VL에 대한 VMO 비율 (VMO:VL)은 1:1인 반면(Souza & Gross., 1991), PFP와 같은 질환이 있는 환자의 경우 0.54:1인 것으로 확인되었다(Powers, 2000). 선행연구에서는 비체중부하 상태에서 무릎관절을 펌을 할 때 VMO가 VL보다 더 활성화되므로 (Laprade, Culham & Brouwer., 1998), 무릎수술 후 열린사슬운동을 실시하는 것이 VMO:VL을 회복하는 데에 효과적이라고 언급하였고(Han, 2004), 실제 비체중부하 운동에서 75-90° 무릎굽힘 범주에서 신장

성 운동의 VMO:VL가 체중부하 운동보다 더 큰 것으로 확인되었다(Tang et al., 2001). 그러나, 본 연구에서는 우세측에서 바벨스쿼트의 어센딩 90° 무릎굽힘 구간(무릎관절 90° 시점에서 135° 시점까지)의 VMO:VL(1.03±0.25)이 레그익스텐션의 90° 무릎굽힘 구간(0.92±0.28)보다 높은 것으로 확인되었는데, 엉덩관절의 움직임, 즉 가쪽돌림(external rotation)과 벌림(abduction)에 따라 넵다리네갈래근, 특히 VL 활성도의 차이를 보이는 것과 관련이 있을 것으로 생각된다(Chen et al., 2018). 또한, 열린사슬 운동의 신장성 수축 시 60° - 90° 무릎굽힘 범주에서 VMO:VL이 1보다 큰 것으로 확인되었으나(Tang et al., 2001), 본 연구에서는 레그익스텐션 동작의 근수축에 따른 VMO:VL의 차이는 확인되지 않은 반면, 비우세측의 바벨스쿼트 어센딩 45° 무릎굽힘 구간(무릎관절 135° 시점에서 180° 시점까지)에서 VMO:VL(0.78±0.31)이 가장 낮게 확인되었고, 나머지 구간에서의 VMO:VL은 차이가 없는 것으로 확인되었다. 이는 닫힌사슬 운동에서 VMO 활성도가 더 선택적으로 증가되는 것(Chen et al., 2018)과 관련이 있을 것으로 생각된다.

V. 결론 및 제언

건강한 보디빌더를 대상으로 운동사슬과 근수축 형태에 따른 안쪽넓은근(VMO)과 가쪽넓은근(VL) 근활성도의 차이를 확인한 결과, 바벨스쿼트의 90° CON 구간에서 VMO와 VL 근활성도가 가장 높게 확인된 반면, 레그익스텐션은 45° CON 구간에서 가장 높은 것으로 확인되었고, 바벨스쿼트의 90° ECC와 90° CON 구간에서 양측의 VMO와 VL 근활성도가 레그익스텐션의 동일구간보다 높은 활성도를 보였으며, 우세측의 VL에 대한 VMO 비율은 바벨스쿼트 90° CON 구간이 레그익스텐션의 동일 구간보다 높은 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 VMO 활성화 및 VL에 대한 VMO 비율 향상을 통한 무릎관절 부상예방 및 안정성을 위한 운동프로그램을 개발하는 데에 있어 레그익스텐션은 무릎관절 펌의 마지막 범위에서 운동을 실시하고 바벨스쿼트는 무릎관절의 90° 굽힘 범위에서 운동을 실시해야 할 것이다.

스쿼트는 하지의 근력과 근비대 및 파워를 향상시키는 데에 사용되는 가장 인기 있는 운동으로, 근육 컨디셔닝을 위해 흔히 사용되는 반면(Coratella et al., 2020; Paoli, Marcolin & Petrone., 2009), 레그익스텐션은 선택적으로 근육을 강화하기 위해 일반적으로 사용하는 방법이다(Irish et al., 2010). 또한, 신장성 수축은 단축성 수축에 비해 생성되는 힘은 더 크지만 에너지 소비량은 낮아 재활 등의 목적으로 널리 사용되는 방법이나(Margaritelis et al., 2021). 본 연구에서는 바벨스쿼트와 레그익스텐션 등의 저항운동에 익숙한 건강한 보디빌더를 대상으로 운동사슬과 근수축 형태에 따른 VMO와 VL의 활성도를 확인하고자 하였으나, 추후 연구에서는 상대 중량과 운동수행 속도의 변화에 따른 하지 근육 활성도의 차이를 확인한다면, 다양한 상황에서의 표준화된 운동수행에 대한 정보를 제공할 수 있을 것으로 생각된다.

- Acaröz Candan, S., Sözen, H., & Arı, E. (2021). Electromyographic activity of quadriceps muscles during eccentric squat exercises: implications for exercise selection in patellar tendinopathy. *Research in Sports Medicine*, 1-11. DOI: 10.1080/15438627.2021.2010200
- Brownstein, B. A., Lamb, R. L., & Mangine, R. E. (1985). Quadriceps torque and integrated electromyography. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 6(6), 309-314.
- Brzycki, M. (1993). Strength testing—predicting a one-rep max from reps-to-fatigue. *Journal of physical education, recreation & dance*, 64(1), 88-90.
- Büker, N., Şavkin, R., Süzer, A., & Akkaya, N. (2021). Effect of eccentric and concentric squat exercise on quadriceps thickness and lower extremity performance in healthy young males. *Acta Gymnica*.
- Chang, W. D., Huang, W. S., Lee, C. L., Lin, H. Y., & Lai, P. T. (2014). Effects of open and closed kinetic chains of sling exercise therapy on the muscle activity of the vastus medialis oblique and vastus lateralis. *Journal of physical therapy science*, 28(9), 1363-1366.
- Chen, S., Chang, W. D., Wu, J. Y., & Fong, Y. C. (2018). Electromyographic analysis of hip and knee muscles during specific exercise movements in females with patellofemoral pain syndrome: an observational study. *Medicine*, 97(28).
- Cheon, S., Lee, J. H., Jun, H. P., An, Y. W., & Chang, E. (2020). Acute effects of open kinetic chain exercise versus those of closed kinetic chain exercise on quadriceps muscle thickness in healthy adults. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(13), 4669.
- Coratella, G., Tornatore, G., Longo, S., Borrelli, M., Doria, C., Esposito, F., & Cè, E. (2020). The Effects of Verbal Instructions on Lower Limb Muscles' Excitation in Back-Squat. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 1-7.
- Dong, C., Li, M., Hao, K., Zhao, C., Piao, K., Lin, W., Fan, Chongyi., Niu, Yingzhen & Fei, W. (2021). Dose atrophy of vastus medialis obliquus and vastus lateralis exist in patients with patellofemoral pain syndrome. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, 16(1), 1-6.
- Escamilla, R. F., Fleisig, G. S., Zheng, N., Barrentine, S. W., Wilk, K. E., & Andrews, J. R. (1998). Biomechanics of the knee during closed kinetic chain and open kinetic chain exercises. *Medicine and science in sports and exercise*, 30(4), 556-569.
- Felicio, L. R., de Carvalho, C. A. M., Dias, C. L. C. A., & dos Santos Vigário, P. (2019). Electromyographic activity of the quadriceps and gluteus medius muscles during/different straight leg raise and squat exercises in women with patellofemoral pain syndrome. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 48, 17-23.
- Han, S. W. (2004). A SEMG analysis of knee joint angle during close kinetic chain exercise and open kinetic chain exercises in quadriceps muscle. *Journal of Korean Physical Therapy*, 16(3), 192-204.
- Hermens, H. J., Freriks, B., Disselhorst-Klug, C., & Rau, G. (2000). Development of recommendations for SEMG sensors and sensor placement procedures. *Journal of electromyography and Kinesiology*, 10(5), 361-374.
- Hertel, J., Earl, J. E., Tsang, K. K. W., & Miller, S. J. (2004). Combining isometric knee extension exercises with hip adduction or abduction does not increase quadriceps EMG activity. *British journal of sports medicine*, 38(2), 210-213.
- Hodges, P. W., & Richardson, C. A. (1993). The influence of isometric hip adduction on quadriceps femoris activity. *Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine*, 25(2), 57-62.
- Hollander, D. B., Kraemer, R. R., Kilpatrick, M. W., Ramadan, Z. G., Reeves, G. V., Francois, M., et al. (2007). Maximal eccentric and concentric strength discrepancies between young men and women for dynamic resistance exercise. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 21(1), 37-40.
- Irish, S. E., Millward, A. J., Wride, J., Haas, B. M., & Shum, G. L. (2010). The effect of closed-kinetic chain exercises and open-kinetic chain exercise on the muscle activity of vastus medialis oblique and vastus lateralis. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 24(5), 1256-1262.
- Jan, M. H., Lin, D. H., Lin, J. J., Lin, C. H. J., Cheng, C. K., & Lin, Y. F. (2009). Differences in sonographic characteristics of the vastus medialis obliquus between patients with patellofemoral pain syndrome and healthy adults. *The American journal of sports medicine*, 37(9), 1743-1749.
- Kendall, F. P., McCreary, E. K., & Provance, P. G. (2005). *Muscles: Testing and function with posture and pain*. (5rd ed.) Baltimore: Lippincott Williams & Wilkins.
- Kettunen, J. A., Visuri, T., Harilainen, A., Sandelin, J., & Kujala, U. M. (2005). Primary cartilage lesions and outcome among subjects with patellofemoral pain syndrome. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 13(2), 131-134.

- Kojic, F., Đurić, S., Ranisavljev, I., Stojiljkovic, S., & Ilic, V. (2021). Quadriceps femoris cross-sectional area and specific leg strength: relationship between different muscles and squat variations. *PeerJ*, 9, e12435.
- Kvist, J., & Gillquist, J. (2001). Sagittal plane knee translation and electromyographic activity during closed and open kinetic chain exercises in anterior cruciate ligament-deficient patients and control subjects. *The American journal of sports medicine*, 29(1), 72-82.
- LaPrade, J., Culham, E., & Brouwer, B. (1998). Comparison of five isometric exercises in the recruitment of the vastus medialis oblique in persons with and without patellofemoral pain syndrome. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 27(3), 197-204.
- Lawrence, R. L., Braman, J. P., LaPrade, R. F., & Ludewig, P. M. (2014). Comparison of 3-dimensional shoulder complex kinematics in individuals with and without shoulder pain, part 1: sternoclavicular, acromioclavicular, and scapulothoracic joints. *Journal of orthopaedic & sports physical therapy*, 44(9), 636-645.
- Margaritelis, N. V., Theodorou, A. A., Chatzinikolaou, P. N., Kyparos, A., Nikolaidis, M. G., & Paschalis, V. (2021). Eccentric exercise per se does not affect muscle damage biomarkers: Early and late phase adaptations. *European Journal of Applied Physiology*, 121(2), 549-559.
- Mike, J. N. (2015). *The effects of eccentric contraction duration of muscle strength, power production, vertical jump and soreness*. The University of New Mexico.
- Mohr, K. J., Kvitne, R. S., Pink, M. M., Fideler, B., & Perry, J. (2003). Electromyography of the quadriceps in patellofemoral pain with patellar subluxation. *Clinical Orthopaedics and Related Research (1976-2007)*, 415, 261-271.
- Muyor, J. M., Martín-Fuentes, I., Rodríguez-Ridao, D., & Antequera-Vique, J. A. (2020). Electromyographic activity in the gluteus medius, gluteus maximus, biceps femoris, vastus lateralis, vastus medialis and rectus femoris during the Monopodal Squat, Forward Lunge and Lateral Step-Up exercises. *PLoS one*, 15(4), e0230841.
- Newman, S. A., Jones, G., & Newham, D. J. (2003). Quadriceps voluntary activation at different joint angles measured by two stimulation techniques. *European journal of applied physiology*, 89(5), 496-499.
- Paoli, A., Marcolin, G., & Petrone, N. (2009). The effect of stance width on the electromyographical activity of eight superficial thigh muscles during back squat with different bar loads. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 23(1), 246-250.
- Powers, C. M. (2000). Patellar kinematics, part I: the influence of vastus muscle activity in subjects with and without patellofemoral pain. *Physical therapy*, 80(10), 956-964.
- Schoenfeld, B. J. (2012). Does exercise-induced muscle damage play a role in skeletal muscle hypertrophy?. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 26(5), 1441-1453.
- Slater, L. V., & Hart, J. M. (2017). Muscle activation patterns during different squat techniques. *Journal of strength and conditioning research*, 31(3), 667-676.
- Souza, D. R., & Gross, M. T. (1991). Comparison of vastus medialis obliquus: vastus lateralis muscle integrated electromyographic ratios between healthy subjects and patients with patellofemoral pain. *Physical therapy*, 71(4), 310-316.
- Stensdotter, A. K., Hodges, P., Mellor, R., Sundelin, G., & Hager-Ross, C. (2003). Quadriceps activation in closed and in open kinetic chain exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 35(12), 2043-2047.
- Tang, S. F., Chen, C. K., Hsu, R., Chou, S. W., Hong, W. H., & Lew, H. L. (2001). Vastus medialis obliquus and vastus lateralis activity in open and closed kinetic chain exercises in patients with patellofemoral pain syndrome: an electromyographic study. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 82(10), 1441-1445.
- Varanoske, A. N., Coker, N. A., Johnson, B. A. D., Belity, T., Mangine, G. T., Stout, J. R., ... & Wells, A. J. (2019). Effects of rest position on morphology of the vastus lateralis and its relationship with lower-body strength and power. *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, 4(3), 64.
- Vecchio, L. D., Daewoud, H., & Green, S. (2018). The health and performance benefits of the squat, deadlift. and bench press. *MOJ Yoga & Physical Therapy*, 3(2), 40-47.
- Wallace, D. A., Salem, G. J., Salinas, R., & Powers, C. M. (2002). Patellofemoral joint kinetics while squatting with and without an external load. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 35(4), 141-148.