



Original Article

Effect of Foot Angle Adjustment on Knee Stability and Movement Performance of Self-weighted Squat in Adult Women

Chanki Kim, Yohan Jeong, Wonbin Hyun, Hyungwoo Lee, and Kyoungkyu Jeon*

Division of Sport Science, Sport Science Institute, Health Promotion Center, Functional Rehabilitation Biomechanics Laboratory, Incheon National University

Article Info

Received 2025. 04. 24.

Revised 2025. 08. 03.

Accepted 2025. 12. 26.

Correspondence*

Kyoungkyu Jeon

jeonkay@inu.ac.kr

Key Words

Squat,
Dynamic knee valgus,
Foot angle,
Lower extremity joint angle,
Kinematics

PURPOSE This study explored foot angle control's influence on lower extremity joints' kinematic variables during bodyweight squats in adult women. The study compared correlation variances among kinematic variables to evaluate foot angle control's impact on knee stability and movement performance. **METHODS** Participants included 29 healthy adult women over 20 years old. Each participant completed three sets of five repetitions under two conditions: foot angles of 0° and foot external rotation angle of 30°. Data analysis used Cortex 8.0 software. A paired sample t-test compared lower limb joint angles and center of mass (COM) height of the pelvic region based on foot angle. The Pearson correlation coefficient was calculated to assess correlations between each dependent variable; to analyze differences, Fisher's Z transformation was applied to significantly correlated pairs. Statistical significance was set at $p < 0.05$. **RESULTS** Findings indicated that, compared to 0° ($p < 0.05$), at a foot external rotation angle of 30°, hip joint abduction, knee joint flexion, and ankle external rotation angles significantly increased, whereas the knee valgus angle significantly decreased ($p < 0.05$). Moreover, at the foot external rotation angle of 30° ($p < 0.01$), pelvic COM's vertical movement range increased, resulting in deeper squats. Correlation analysis among lower extremity joint kinematic variables under different foot angle conditions showed no significant differences. **CONCLUSIONS** At a foot external rotation angle of 30°, adult women performed bodyweight squats with reduced knee valgus angle and potentially decreased knee joint loading, indicating lower risk of injury and increased squat depth due to enhanced lower extremity joint freedom. Thus, adjusting the foot angle to 30° during adult women's bodyweight squats can be recommended to enhance knee stability and movement performance.

서론

스쿼트는 다양한 저항 운동과 훈련 프로그램 등에서 주로 사용되며 체력 및 컨디셔닝뿐만 아니라 재활 분야에서도 다양하게 사용되고 있다(Contreras et al., 2016; Escamilla, 2001). 또한, 무릎과 엉덩이 관절의 신전근 강화를 통한 하지 근력 향상과 상지와 하지의 협응

력을 향상시키는 주요 목적을 가지고 있다(Asayama et al., 2021; Swinton et al., 2012). 이처럼 스쿼트는 근력 강화와 협응력 향상에 매우 효과적인 운동이지만, 바르지 못한 자세로 수행하게 될 경우 동적 무릎 외반(dynamic knee valgus, DKV) 증가로 인한 하지 정렬 변화와 함께 무릎 관절 질환을 발생시킬 수 있다(Escamilla, 2001; Slater & Hart, 2017).

동적 무릎 외반은 일반적으로 엉덩이 관절의 내전 및 내회전, 무릎 관절의 외전 및 외회전 그리고 발목 관절의 회내 등의 결합으로 만들어지는 하지의 움직임 패턴이다(Hewett et al., 2005). 이러한 움직임 패턴은 동적 활동 중에 하지에서 관찰되는 일반적인 기능 장애이

© This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

며, 무릎 부상의 기본 메커니즘이라 보고되고 있다(Alzahrani et al., 2021). 실제로 동적 무릎 외반 증가는 하지 정렬에 영향을 주고 슬개 대퇴 관절(patellofemoral joint) 내 압박력을 증가시켜 슬개 대퇴 통증 증후군(patellofemoral pain syndrome, PFPS)을 야기시킬 뿐만 아니라 비접촉 전방십자인대 손상과 같은 급성 및 만성 손상의 원인으로 나타날 수 있는 요인을 가지고 있다(Hewett et al., 2006; Hewett et al., 2005). 슬개 대퇴 통증 증후군은 Q-각도(Q-Angle)가 높아질수록 위험성이 증가하는데, 여성의 경우 남성보다 평균 Q-각도가 크기 때문에 슬개 대퇴 통증 증후군에 더욱 취약한 것으로 알려져 있으며, 정상 범위를 초과한 과도한 Q-각도 증가는 무릎 정렬 이상을 일으켜 여러 무릎 부상의 원인이 될 수 있다(Sendur et al., 2006; Smith et al., 2008). 또한, 여성은 남성에 비해 골반이 상대적으로 넓고 대퇴 길이에 대한 골반 폭의 비율이 크며 이로 인해 Q-각도가 크게 나타나는 경향이 있으며, 이러한 구조적 차이가 과도한 무릎 외반 정렬을 유발하는 원인으로 지목된다(Horton & Hall, 1989; Shambaugh et al., 1991). 실제로 여성 스포츠 선수의 비접촉성 전방십자인대 부상 발생률은 남성 선수보다 3~8배 높다는 보고가 있으며(Hewett et al., 2006), 이는 위와 같은 해부학적 요인들이 복합적으로 작용한 결과로 추정된다. 이 밖에도 여성은 남성보다 대퇴골 용기사이패임(intercondylar notch) 폭이 좁고, 햄스트링 대 대퇴사두근의 근력 비율이 낮으며, 무릎 및 엉덩 관절의 가동 범위와 인대 이완성 등이 크기 때문에 여러 해부학적·신체 역학적 차이가 존재하여 무릎의 안정성을 감소시키는 요인으로 작용할 수 있다(Beynon et al., 2014; Huston & Wojtyś, 1996).

일반적으로 스쿼트 동작을 수행할 때는 발을 어깨 너비 이상으로 벌려 지면에 안정적으로 지지하고, 양쪽 발의 각도를 각각 10도 이하로 바깥쪽을 향하도록 하는 것이 바람직하다(Comfort & Kasim, 2007; Myer et al., 2014). 스쿼트 동작 시 운동의 효과를 변화시킬 수 있는 기술은 신체 위치, 시선 방향, 스쿼트 깊이, 발의 너비와 각도 등을 조절하는 것이 포함된다(Lorenzetti et al., 2018). 이는 모두 관절 가동범위에 상당한 영향을 미치기 때문에, 스쿼트 운동의 효과, 안정성 등의 변화를 위해 적용된다(Asayama et al., 2021). 이러한 스쿼트 기술 중 하나인 하강 깊이의 변화는 운동 강도를 결정하는 요소이며, 골반 하강의 깊이에 따라 쿼터(Quarter), 하프(Half), 딥(Deep) 스쿼트로 구분할 수 있다(Senter & Hame, 2006). 이러한 스쿼트 중 딥 스쿼트는 수직 방향으로의 이동이 크기 때문에 다른 종류의 스쿼트보다 강도가 높아, 동원되는 근육의 수와 근활성도가 증가한다(Schoenfeld, 2010). Escamilla et al.(2001)이 스쿼트 시 발의 너비에 따른 무릎 전단력(knee shear force)과의 관련성을 분석한 연구에서는, 발의 너비를 좁은 너비(87~118%) 이상으로 발을 벌릴 경우 무릎 전단력이 줄어드는 효과가 있다는 결과를 제시하였다. 이와 같이, 발의 너비와 각도를 조절하여 스쿼트를 수행할 때 무릎관절의 불안정성에 미치는 영향을 분석한 연구는 주로 성인 남성(Paoli et al., 2009; Swinton et al., 2012) 또는 남녀 혼합 집단을 대상으로 수행되어 왔다(Han et al., 2013; Lorenzetti et al., 2018; Asayama et al., 2021). 그러나 젊은 성인 여성을 단독으로 모집하여 발의 외회전 각도 증재가 무릎 외반 각도, 굴곡 각도와 같은 하지 관절 각도 및 골반 질량중심의 높이와 같은 복합적인 변인에 미치는 영향을 분석하고, 하지 관절의 운동학적 변인 간 상관관계를 적용한 연구는 미비한 실정이다.

따라서 본 연구는 성인 여성의 자가체중 스쿼트 시 발의 외회전 각도의 변화가 하지 관절 각도 및 골반 질량중심 높이에 미치는 영향을 분석하고, 발의 외회전 각도에 따른 하지 관절의 운동학적 변인 간 상관관계 차이를 비교하여 발 외회전 각도 조절이 무릎 안정성과 동작 수행 능력에 미치는 영향을 이해하는 데 목적이 있다. 본 연구의 가설은 다음과 같다. 첫째, 발의 외회전 각도가 증가할수록 무릎 굴곡 각도는 증가할 것이다. 둘째, 발의 외회전 각도가 증가할수록 무릎 외반 각도는 감소할 것이다. 셋째, 발의 외회전 각도가 증가할수록 골반 하강 깊이는 증가할 것이다. 이러한 결과를 통해 성인 여성의 자가체중 스쿼트 수행 시 부상 예방을 위한 운동 가이드라인 마련에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

연구방법

연구대상

연구 대상은 인천 지역에 거주하는 20대 성인 여성으로, 최근 1년 이내에 하지 주요 관절을 포함한 근골격계 이상이 없고 스쿼트 자세를 문제 없이 수행할 수 있는 29명을 모집하였다. 대상자 수는 G*Power 3.1.9.7 프로그램을 사용하여 사전 분석을 통해 산출하였다. 반복 측정 분산 분석(Within-Between Interaction)을 기반으로 유의 수준 0.05, 검정력 0.80, 효과 크기 0.3(중간 수준), 반복 측정 간 상관계수 0.5, 비구면성 교정 계수 1을 설정하였을 때 총 필요 대상자 수는 24명이었으며, 탈락률 20%를 고려하여 최종 29명을 모집하였다. 본 연구는 인천대학교 기관생명윤리위원회(INU IRB No. 7007971-202207-004A)의 승인을 받은 후 실시되었으며, 실험 전에 연구 목적과 절차를 충분히 설명하고 대상자들의 자발적 동의를 얻은 후 진행하였다. 대상자들의 신체적 특성은 <Table 1>과 같다.

연구절차

자가체중 스쿼트 동작 분석을 위해 <Fig. 1>과 같이, 최대 무릎 굴곡을 분석 시점을 설정하였다. Escamilla 등(2001)과 Lorenzetti(2018)의 선행연구를 참고하여 발의 너비는 대상자의 양쪽 전상장골극 사이 거리를 기준으로 150%를 계산하여 설정하였고, 기준은 각 발의 뒷꿈치 사이 거리로 하였다. 두 가지 형태의 발 각도, 즉 중립 각도인 0도와 외회전 30도 자세에서 자가체중 스쿼트 동작을 측정하였다.

Table 1. Information of participants

Variables	M±SD
<i>n</i>	29
Age (years)	22.03±2.19
Height (cm)	162.59±3.05
Weight (kg)	56.07±6.16
BMI(kg/m ²)	21.17±2.08

Note: Mean±Standard deviation

Abbreviation. BMI: Body mass index, M: Mean, SD: Standard deviation.

발의 중립은 <Fig. 2>와 같이, 종골의 중심과 두 번째 발가락을 연결한 가상의 직선과 평행한 방향으로 정의하였으며, 외회전은 중립 위치에서 외측으로 30도 벌어진 방향으로 <Table 2>와 같이 설정하였다. Glave(2012)의 선행연구를 기반으로 팔을 어깨 높이까지 들어 전방으로 뻗은 자세로 동작을 수행하였다.



Fig. 1. Maximum Knee Flexion (MKF)

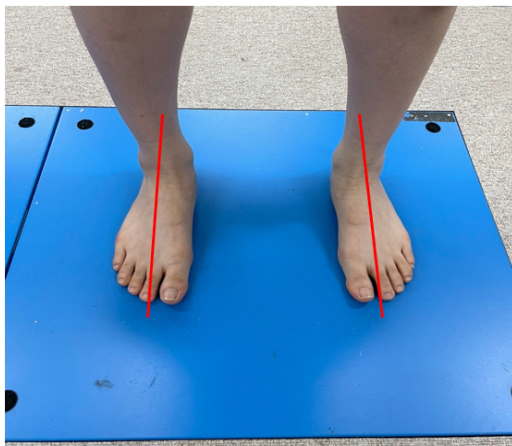




Fig. 2. Neutral foot position

Table 2. Foot angle conditions during self-weighted squats

Foot angle	Foot width	Foot position
0°	150% of the distance between the ASIS	
30°	150% of the distance between the ASIS	

Abbreviation. ASIS: Anterior superior iliac spines

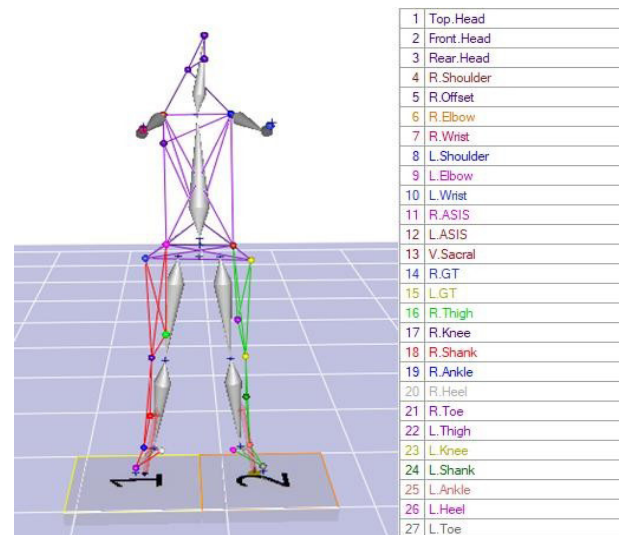


Fig. 3. Modified helen hayse markers set

자료처리 및 분석

동작의 운동학적 및 운동역학적 분석을 위해 동작 분석 시스템 (Motion Analysis Corp., USA)과 지면반력기(AMTI, USA) 2대를 사용하였다. 동작 분석은 Modified Helen Hayes Markers Set(Kadaba et al., 1989)을 기반으로 수행하였으며, 대상자의 하지 관절을 중심으로 총 29개의 반사 마커를 부착하였다(Fig. 3). 자가체 중 스쿼트 시 스쿼트 깊이를 보다 정확히 측정하기 위해 대퇴골의 대전자(greater trochanter)에 추가로 2개의 마커를 부착하였다. 이후 실험 동작 수행 시 마커 간섭을 줄이기 위해 양측 무릎과 발목 관절의 내측 마커를 모두 제거하여 총 27개의 마커를 기준으로 동작을 측정하였다.

영상 분석을 위해 Motion Analysis 사의 Eagle Camera 6대, Raptor-E Camera 2대, Kestrel 2200 Camera 6대로 구성된 총 14대의 영상 분석 카메라를 대상자의 전후 방향과 좌우 방향을 모두 포함하도록 설정하였다. 영상 분석 전, 모든 카메라가 측정 범위를 충분히 포함하도록 측정 공간의 좌표계를 설정하는 영점 조정(calibration) 작업을 수행하였으며, 영상 분석 샘플링 속도는 120 frames/sec로 설정하였다. 이때, 대상자가 바라보고 있는 방향을 기준으로 앞과 뒤를 Y축, 좌우 방향을 X축, 지면과 수직인 상하 방향을 Z축으로 설정하여 분석 기준 좌표축으로 활용하였다.

수집된 운동학적 데이터는 신체를 분절로 연결된 강체 시스템으로 설정한 후, 인체 관절 중심점을 좌표화하여 분석하였다. 측정된 좌표 데이터는 Butterworth low-pass digital filtering 기법을 이용하여 스무딩 처리하였으며, 차단주파수(cut-off frequency)를 10 Hz로 설정하여 필터링하였다. 분석 시 오차 범위는 0.3 mm 이내로 제한하였다. 지면반력 데이터는 1,200 Hz의 속도로 샘플링 하였으며, 모든 장비의 데이터는 아날로그-디지털 변환기(A/D converter, NI-USB 6218, National Instruments, Hungary)를 사용하여 동기화하였다. 또한, 골반 질량중심(COM-Z) 수치는 피험자의 신장으로 정규화하여 신장에 따른 영향을 최소화하고, 대상자 간의 COM 하강 깊이를 보다 타당하게 비교할 수 있도록 하였다.

통계 처리

본 연구의 모든 데이터는 Windows용 통계 프로그램인 SPSS 28.0(IBM, USA)을 사용하여 분석하였고, 수집된 변인들은 평균과 표준편차(Mean \pm SD)로 산출하였으며, 정규성 확인을 위해 Shapiro-Wilk 검정을 수행하였다. 발 각도 조건에 따른 성인 여성의 자가체중 스쿼트 시 집단 내 하지 관절 각도 및 골반 질량중심 높이의 차이를 비교하기 위해 대응표본 *t*검정(Paired sample *t*-test)을 적용하였다. 효과 크기(ES: effect size)를 평가하기 위해 Cohen's D를 계산하였으며, 효과 크기 값을 작음(ES: 0.2~0.5), 중간(ES: 0.5~0.8), 큼(ES: ≥ 0.8)으로 정의하였다(Cohen, 2013). 발 각도 조건은 피어슨 상관계수(Pearson correlation coefficient)를 이용해 각 종속 변인 간의 상관을 분석하였으며, 유의미한 상관관계를 보이는 변인 쌍에 한하여 Fisher의 Z변환을 적용하여 차이를 분석하였다. 또한, 분석 결과를 시각적으로 명확히 전달하기 위해 Python 프로그래밍 언어를 사용하여 상관관계 히트맵을 제시하였다. 모든 통계처리의 유의 수준은 $p=0.05$ 로 설정하였다.

연구결과

발 각도에 따른 하지 관절의 각도

성인 여성의 자가체중 스쿼트 시 최대 무릎 굴곡 시점에서 발 각도에 따른 하지 관절 각도 변인에 대한 결과는 <Table 3>과 같다.

Table 3. Information of participants

Variables		Foot Angle	Joint Angle	ES (Cohen's D)	<i>t</i>	<i>p</i>
Hip	Flexion	0°	104.68±9.25	-.350	-1.911	.066
		30°	106.44±10.82			
	Abduction	0°	14.97±4.52	-3.160	-17.015	≤.001
		30°	29.67±6.72			
	Internal Rotation	0°	10.79±5.02	.158	.849	.403
		30°	10.07±5.85			
Knee	Flexion	0°	109.94±8.14	-.667	-3.594	≤.001
		30°	113.92±10.03			
	Valgus	0°	-4.36±4.24	.675	3.636	≤.001
		30°	-5.47±4.42			
	Internal Rotation	0°	16.35±6.83	1.315	7.083	≤.001
		30°	8.55±10.39			
Ankle	Plantar flexion	0°	16.78±4.98	.141	.745	.463
		30°	16.25±6.40			
	Eversion	0°	-13.23±2.66	.144	0.776	.444
		30°	-13.43±6.53			
	External Rotation	0°	9.45±5.44	-1.621	-8.728	≤.001
		30°	11.79±5.39			

*** $p \leq .001$

Note. Data are mean \pm standard deviation.

Abbreviation. ES: Effect size

엉덩 관절 각도는 발 각도 0°와 발의 외회전 각도 30°에서 엉덩 관절 외전 각도의 유의한 차이가 나타났으며($t_{28}=-17.015$, $p \leq .001$), 효과 크기는 -3.160으로 큼에 해당하는 것으로 나타났다. 발 각도에 따른 엉덩 관절 굴곡 및 내회전 각도에서는 유의한 차이가 나타나지 않았다.

무릎 관절 각도는 발 각도 0°와 발의 외회전 각도 30°에서 무릎 관절 굴곡 각도의 유의한 차이가 나타났으며($t_{28}=-3.594$, $p \leq .001$), 효과 크기는 -0.667로 중간에서 큼 사이에 해당하는 것으로 나타났다. 무릎 관절 외반 각도에서 유의한 차이가 나타났으며($t_{28}=3.636$, $p \leq .001$), 효과 크기는 0.675로 중간에서 큼 사이에 해당하는 것으로 나타났다. 무릎 관절 내회전 각도에서도 유의한 차이가 나타났으며($t_{28}=7.083$, $p \leq .001$), 효과 크기는 1.315로 큼에 해당하는 것으로 나타났다.

발목 관절 각도는 발 각도 0°와 발의 외회전 각도 30°에서 발목 관절 외회전 각도의 유의한 차이가 나타났으며($t_{28}=-8.728$, $p \leq .001$), 효과 크기는 -1.621로 큼에 해당하는 것으로 나타났다. 발 각도에 따른 발목 관절 배측 굴곡 및 외반 각도에서는 유의한 차이가 나타나지 않았다.

골반 질량중심 높이(Pelvic COM-Z)와 위치 변화

발 각도에 따른 골반 질량중심 높이(pelvic COM-Z)와 골반 질량중심 높이의 위치 변화(pelvic COM-Z displacement)를 나타내기 위해 초기 무릎 굴곡 시점의 질량중심 높이와 최대 무릎 굴곡 시점의 질량중심 높이의 차이를 분석한 결과, 발 각도 0°와 발의 외회전 각도 30° 간 골반 질량중심 높이($t_{28}=3.502$, $p=.002$)와 골반 질량중심 높이의 위치 변화($t_{28}=-2.832$, $p=.008$)에서 유의한 차이가 나타났으며, 효과 크기는 골반 질량중심 높이 0.650, 질량중심 높이의 변화 -0.526로 골반 질량중심의 변인 모두 큼에 해당하는 것으로 나타났다(Table 4).

발 각도 조절에 따른 각 하지 관절의 운동학적 변인 간 상관관계 차이

성인 여성의 자가체중 스쿼트 시 0°와 30° 조건 간 최대 무릎 굴곡 시점에서 발 각도에 따른 하지 관절의 운동학적 변인 간 상관계수와 상관계수 차이에 대한 결과는 <Table 5>, <Fig. 4>와 같다.

Table 4. Results of pelvic kinematic variables at maximum knee flexion (Unit: %)

Variables	Foot Angle	Value	ES (Cohen's D)	<i>t</i>	<i>p</i>
COM-Z	0°	30.30 \pm 2.95	.650	3.502	.002
	30°	29.10 \pm 3.62			
COM-Z Displacement	0°	22.93 \pm 2.89	-.526	-2.832	.008
	30°	23.90 \pm 3.58			

** $p < .01$

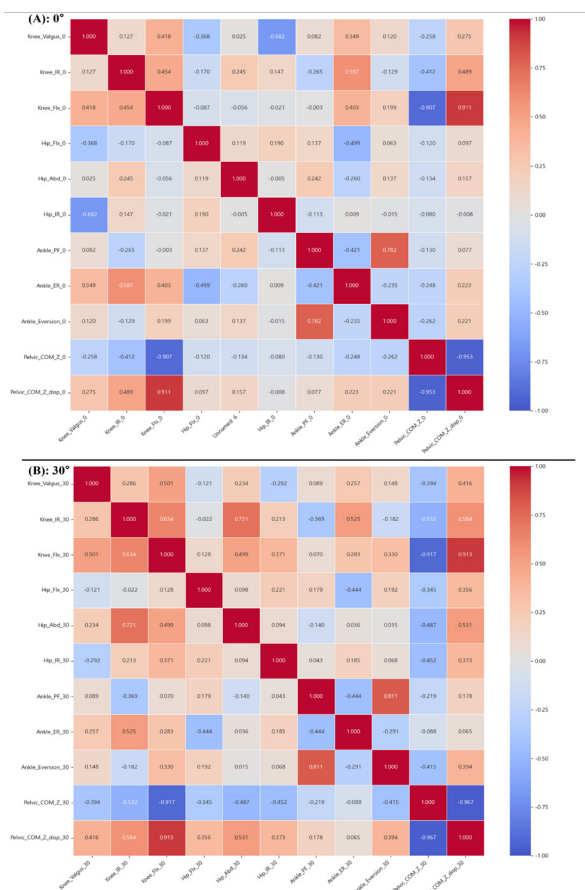
Note. Data are mean \pm standard deviation.

Abbreviation. COM: center of mass

Table 5. Difference in correlation coefficients of lower limb kinematic variables by foot angle

Pair	r (0°)	r (30°)	FZ (0°)	FZ (30°)	ZD	SE	Z-test	p
Knee valgus Knee flexion	.42	.50	.45	.55	-.102	.196	-.366	.714
Knee flexion Knee IR	.45	.63	.48	.74	-.257	.196	-.926	.355
Knee flexion Pelvic-Z MKF	-.91	-.92	-1.53	-1.59	.062	.196	.222	.825
Knee flexion Pelvic-Z Disp	.91	.93	1.53	1.66	-.131	.196	-.667	.505
Ankle ER Knee IR	.59	.53	.68	.59	.088	.196	.316	.752
Ankle ER Hip flexion	-.50	-.44	-.55	-.47	-.077	.196	-.278	.781
Pelvic-Z Disp Knee IR	.49	.58	.54	.66	-.126	.196	-.456	.649
Pelvic-Z Disp Pelvic-Z MKF	-.95	-.97	-1.83	-2.09	.261	.196	.939	.348

Abbreviation. FZ: Fisher Z, ZE: Z Difference, SE standard error, IR: internal rotation, ER: external rotation, Disp: displacement, MKF: Maximum knee flexion.

**Fig. 2.** Neutral foot position

Abbreviations. ER: external rotation, Disp: displacement, IR: internal rotation, DF: dorsi flexion, COM: center of mass, MKF: maximum knee flexion.

최대 무릎 굴곡 시점에서 무릎 관절 굴곡 각도와 골반 질량중심 높이 간 0°와 30° 모두 높은 음의 상관($r=-0.91$, -0.92)이 나타났으며, 무릎 관절 굴곡 각도와 골반 질량중심 높이 차이 간 높은 양의 상관($r=0.91$, 0.93)이 나타났다. 발 각도 0°와 발의 외회전 각도 30° 각각의 운동학적 주요 변인들 간 유의한 상관관계($p \leq .05$)를 비교한 결과 모든 변인에서 유의미한 차이가 나타나지 않았다.

논 의

본 연구는 성인 여성의 자가체중 스쿼트 시 적절한 발 각도 조절이 무릎 안정성과 동작 수행 능력에 미치는 영향에 대해 조사하여 스쿼트 동작의 적합한 발 각도를 제시하고자 하였다.

무릎 외반 각도의 증가는 비접촉성 무릎 부상의 주요 위험 요인으로 알려져 있으며, 이는 주변 연부 조직에 스트레스를 가하여 슬개대퇴통증증후군과 같은 만성 손상은 물론, 전방십자인대 손상과 같은 급성 외상으로 이어질 수 있다(Mozafaripour et al., 2021). Escamilla(2001)는 하지 정렬이 유지되지 않은 상태에서 스쿼트를 수행할 경우 전단력 및 압박력이 증가하여 무릎 주변 인대 및 힘줄에 부정적인 영향을 미친다고 보고하였다. 특히, Hewett et al.(2005)은 여성의 경우 해부학적으로 더 큰 Q-angle, 엉덩관절 내회전, 무릎 외반 경향을 보이며, 이러한 요인들이 무릎 손상에 대한 취약성을 높인다고 지적하였다. 실제로 무릎 외반 각도의 증가는 여성에서 전방십자인대 손상 위험을 유의하게 증가시키는 요소로 작용한다(Saber et al., 2024). 따라서 스쿼트 수행 시 무릎 정렬 개선을 위한 중재 전략이 더욱 중요하다고 할 수 있다. 본 연구 결과, 발 각도 0° 조건에 비해 발의 외회전 각도 30° 조건에서 최대 무릎 굴곡 시 무릎 외반 각도가 유의하게 감소하는 양상이 나타났으며, 이는 발의 외회전 각도가 커질수록 무릎 정렬이 보다 안정되는 경향을 시사한다. 이러한 결과

는 본 연구의 두 번째 가설과 일치하며, 발의 외회전 각도 30° 설정이 무릎 관절 정렬 측면에서 보다 안전한 수행 전략이 될 수 있음을 보여 준다. 다만, 본 연구에서는 0°와 30° 조건만을 비교 대상으로 하였기 때문에 30°가 최적의 발 각도라고 단정하기는 어렵다. 그럼에도 불구하고, 발의 외회전 각도 30° 조건이 여성 대상 스쿼트 수행에서 무릎 외반 각을 감소시키고 부상 위험을 줄이는 데 있어 유의미한 결과를 보였다는 점에서, 향후 운동 지도 및 부상 예방 전략 수립 시 유용한 기준으로 고려될 수 있을 것이다.

자가체중 스쿼트 수행 시 발의 외회전 각도를 0°에서 30°로 조절한 조건은 최대 무릎 굴곡 시점에서 엉덩 관절의 외전, 무릎 관절의 굴곡, 발목 관절의 외회전 각도를 증가시키는 동시에, 무릎 관절의 외반 및 내회전 각도를 감소시키는 것으로 나타났다. 이러한 하지 관절 가동 범위 증가는 골반의 질량중심을 하강시켜 결과적으로 더 깊은 스쿼트 수행으로 이어졌으며, 실제로 30° 조건에서 골반의 COM-Z가 더 낮고, 이벤트 간 높이 변화량 또한 큰 것으로 확인되었다. 이는 발을 바깥쪽으로 회전시킬 경우 엉덩 관절의 공간과 가동성이 확보되고, 무릎 외전 및 정렬 안정성이 개선되어 깊은 스쿼트가 가능해진다는 기존의 생체역학적 설명과 일치한다(Song & So, 2019; Kasahara et al., 2024). Lorenzetti et al.(2018). 또한, 발의 외회전 각도 증가가 엉덩 관절의 외전 및 무릎 관절의 굴곡 가동범위를 증가시켜 효율적인 스쿼트 자세를 유도한다고 보고하였는데, 본 연구 결과도 이와 유사한 경향을 보였다. 이처럼 관절 움직임 증가는 골반 질량중심의 하강과 밀접하게 관련되어 스쿼트의 깊이를 증가시키며 동작 수행 능력을 높이는 데 기여할 수 있다. Kubo et al.(2019)의 연구에 따르면, 더 깊은 스쿼트는 엉덩 관절 내전근과 둔근의 근육량을 증가시키고, 스프린트 및 점프 능력 향상과도 관련이 있는 것으로 보고된 바 있다. 따라서 발의 외회전 각도를 30°로 설정하는 것은 단순히 가동범위 증가뿐 아니라, 수행 능력 측면에서도 유리한 조건을 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

일반적으로 발의 외회전 각도의 증가에 따라 대퇴골두의 외회전이 동반되며, 이로 인해 엉덩 관절과 무릎관절의 회전 자유도가 확대되어 하강 동작에서 더 깊은 스쿼트 수행을 유도하는 것으로 알려져 있다(Lorenzetti et al., 2018). 다만, 본 연구는 최대 무릎 굴곡 시점(MKF)을 기준으로 분석을 수행하였기 때문에, 해당 시점에서의 엉덩 관절 외회전 각도 차이는 유의하지 않았다. 이는 발의 외회전 각도 증가의 효과가 MKF 이전 구간에서 보다 뚜렷하게 나타났을 가능성을 시사하며, 발각도 조절의 기계적 이점을 보다 정밀하게 이해하기 위해서는 향후 전체 동작 구간을 시계열 기반 분석을 통해 파악할 필요가 있다.

한편, 발의 외회전 각도의 증가가 구조적으로 발 중심 간 거리의 확장을 동반한다는 점을 고려할 때, 골반 질량중심(COM-Z)의 하강은 단순한 관절 가동성 변화뿐 아니라 기하학적 구조 변화에 의한 영향일 가능성도 존재한다. 본 연구에서는 발 너비를 전상장골극 간 거리의 150%로 고정하고, 발 뒷꿈치 간 거리만을 기준으로 발의 외회전 각도를 조절하였으므로, 30° 조건에서 발 중심 간 간격이 넓어졌을 가능성이 크다. 이로 인해 골반 높이가 자연스럽게 낮아졌을 수 있으며, 이는 발 위치 변화에 따른 기하학적 결과일 수 있다. 다만, 본 연구에서는 발 중심 간 거리의 좌표 기반 수치를 독립적으로 측정하

지 않았기 때문에, COM-Z 하강이 발의 외회전 각도 조절에 따른 관절 가동성 변화의 결과인지, 혹은 단순한 기하학적 확장의 결과인지 정량적으로 구분하기에는 제한이 존재한다. 따라서 향후 연구에서는 발 중심 간 거리의 변화량을 명확히 제시하고, 이를 통제된 조건에서 COM-Z 및 관절 정렬에 미치는 영향을 분석함으로써 발의 외회전 각도 조절의 독립 효과를보다 정밀하게 규명할 필요가 있다.

본 연구에서는 최대 무릎 굴곡 시점(MKF)을 기준으로 주요 운동 역학적 변인 간의 상관관계를 분석하여, 발의 외회전 각도 변화가 하지 관절 간 협응 구조에 미치는 영향을 간접적으로 평가하고자 하였다. 이는 단일 관절의 움직임 변화보다는 관절 간 움직임의 상호작용 구조, 즉 정렬 패턴의 유지 여부를 확인함으로써, 발의 외회전 각도 조절이 스쿼트 수행 시 동작의 구조적 안정성에 어떤 영향을 주는지를 탐색하기 위한 목적이다. 그 결과, 발 각도 0° 및 발의 외회전 각도 30° 조건 모두에서 무릎 관절의 굴곡 각도와 골반의 질량중심 높이 간에는 높은 음의 상관관계($r=-0.91$, -0.92)가 나타났고, 무릎 굴곡 각도와 질량중심 변화량 간에도 높은 양의 상관관계($r=0.91$, 0.91)가 확인되었다. 이는 무릎의 굴곡이 깊을수록 골반의 하강이 크게 나타나며, 발 각도와 관계없이 이러한 관절 간 운동학적 관계가 안정적으로 유지됨을 시사한다(Zawadka et al., 2020). 또한, Fisher의 Z 변환을 통해 0°와 30° 조건 간 상관계수를 비교한 결과 유의한 차이는 나타나지 않았다. 이에 따라, 발의 외회전 각도 변화는 스쿼트 수행 시 절대적인 관절 가동범위나 질량중심 이동에는 영향을 미쳤지만, 관절 간의 상대적 협응 구조에는 유의미한 변화를 유발하지 않은 것으로 해석된다. 다시 말해, 발의 외회전 각도 30° 조건은 스쿼트의 깊이나 무릎 안정성 향상에는 기여하였으나, 하지 관절 간의 정렬 및 상호작용 구조는 기존의 패턴을 유지하였다. 이러한 결과는 발의 외회전 각도 조절이 동작 패턴의 구조적 일관성을 유지하면서도 수행 특성을 개선할 수 있는 유효한 중재 전략이 될 수 있음을 시사한다.

결론 및 제언

본 연구는 성인 여성의 자가체중 스쿼트 시 발 각도의 조절이 무릎 안정성과 동작 수행 능력에 미치는 영향을 분석하였다. 연구 결과, 발의 외회전 각도를 30°로 설정하여 스쿼트 시 최대 무릎 굴곡 시점(MKF)에서 무릎 외반 각도가 감소하고, 무릎 굴곡, 엉덩 관절 외전 및 발목 외회전 각도가 증가하였으며, 골반 질량 중심의 수직 움직임이 증가하였다. 이는 발의 외회전 각도의 적절한 조정이 스쿼트 시 무릎 외반 각도를 감소시켜 무릎의 안정성을 증가시키고, 하지 관절의 가동범위를 증대시켜 골반 질량중심의 더 큰 하강을 가능하게 함으로써 더 깊은 스쿼트 수행을 유도하였음을 의미한다.

다만, 본 연구는 근활성도와 같은 생리학적 변인이나 운동 중재를 포함하지 않았고, 발의 외회전 각도 조건이 0°와 30°의 두 가지에 한정되었으며, 스쿼트 전체 구간이 아닌 최대 무릎 굴곡 시점에서의 분석만을 수행했다는 제한점을 가진다. 따라서 향후 연구에서는 이러한 생리학적 변인을 포함한 추가적인 분석과 함께 다양한 스쿼트 깊이와 발의 외회전 각도를 중재하여 보다 구체적인 운동 지침을 제시할 필요가 있다.

결론적으로, 성인 여성의 자가체중 스쿼트 시, 발의 외회전 각도를 0°가 아닌 30°로 조정하는 것은 무릎 안정성과 동작 수행 능력을 높이는 데 효과적이며, 이는 운동 수행의 향상과 부상 예방에 기여할 수 있을 것이다.

CONFLICT OF INTEREST

논문 작성에 있어서 어떠한 조직으로부터 재정을 포함한 일체의 지원을 받지 않았으며 논문에 영향을 미칠 수 있는 어떠한 관계도 없음을 밝힌다.

AUTHOR CONTRIBUTION

Conceptualization: Kyoungkyu Jeon & Chanki Kim, Data curation: Chanki Kim & Hyungwoo Lee, Formal analysis: Yohan Jeong & Wonbin Hyun, Methodology: Kyoungkyu Jeon & Chanki Kim, Project administration: Kyoungkyu Jeon, Visualization: Kyoungkyu Jeon & Chanki Kim, Writing-original draft: Kyoungkyu Jeon & Chanki Kim, Writing-review & editing: Kyoungkyu Jeon & Chanki Kim

참고문헌

- Alzahrani, A. M., Alzhrani, M., Alshahrani, S. N., Alghamdi, W., Alqahtani, M., & Alzahrani, H. (2021). Is hip muscle strength associated with dynamic knee valgus in a healthy adult population? A systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(14), 7669.
- Asayama, A., Tateuchi, H., Yamagata, M., & Ichihashi, N. (2021). Influence of stance width and toe direction on medial knee contact force during bodyweight squats. *Journal of Biomechanics*, 129, 110824.
- Beynon, B. D., Vacek, P. M., Newell, M. K., Tourville, T. W., Smith, H. C., Shultz, S. J., Slauterbeck, J. R., & Johnson, R. J. (2014). The effects of level of competition, sport, and sex on the incidence of first-time noncontact anterior cruciate ligament injury. *The American Journal of Sports Medicine*, 42(8), 1806-1812.
- Cohen, J. (2013). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. routledge.
- Comfort, P., & Kasim, P. (2007). Optimizing squat technique. *Strength & Conditioning Journal*, 29(6), 10-13.
- Contreras, B., Vigotsky, A. D., Schoenfeld, B. J., Beardsley, C., & Cronin, J. (2016). A comparison of gluteus maximus, biceps femoris, and vastus lateralis electromyography amplitude in the parallel, full, and front squat variations in resistance-trained females. *Journal of Applied Biomechanics*, 32(1), 16-22.
- Escamilla, R. F. (2001). Knee biomechanics of the dynamic squat exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 33(1), 127-141.
- Glave, A. P., Olson, J. M., Applegate, D. K., & Di Brezzo, R. (2012). The effects of two different arm positions and weight status on select kinematic variables during the bodyweight squat. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 26(11), 3148-3154.
- Han, S., Ge, S., Liu, H., & Liu, R. (2013). Alterations in three-dimensional knee kinematics and kinetics during neutral, squeeze and outward squat. *Journal of Human Kinetics*, 39, 59.
- Hewett, T. E., Myer, G. D., & Ford, K. R. (2006). Anterior cruciate ligament injuries in female athletes: Part 1, mechanisms and risk factors. *The American Journal of Sports Medicine*, 34(2), 299-311.
- Hewett, T. E., Myer, G. D., Ford, K. R., Heidt Jr, R. S., Colosimo, A. J., McLean, S. G., Van den Bogert, A. J., Paterno, M. V., & Succop, P. (2005). Biomechanical measures of neuromuscular control and valgus loading of the knee predict anterior cruciate ligament injury risk in female athletes: A prospective study. *The American Journal of Sports Medicine*, 33(4), 492-501.
- Horton, M. G., & Hall, T. L. (1989). Quadriceps femoris muscle angle: Normal values and relationships with gender and selected skeletal measures. *Physical Therapy*, 69(11), 897-901.
- Huston, L. J., & Wojtys, E. M. (1996). Neuromuscular performance characteristics in elite female athletes. *The American Journal of Sports Medicine*, 24(4), 427-436.
- Kadaba, M. P., Ramakrishnan, H., Wootten, M., Gaine, J., Gorton, G., & Cochran, G. (1989). Repeatability of kinematic, kinetic, and electromyographic data in normal adult gait. *Journal of Orthopaedic Research*, 7(6), 849-860.
- Kasahara, S., Ishida, T., Linjing, J., Chiba, A., Samukawa, M., & Tohyama, H. (2024). Relationship among the COM motion, the lower extremity and the trunk during the squat. *Journal of Human Kinetics*, 93, 29-39.
- Kubo, K., Ikebukuro, T., & Yata, H. (2019). Effects of squat training with different depths on lower limb muscle volumes. *European Journal of Applied Physiology*, 119, 1933-1942.
- Lorenzetti, S., Ostermann, M., Zeidler, F., Zimmer, P., Jentsch, L., List, R., Taylor, W. R., & Schellenberg, F. (2018). How to squat? Effects of various stance widths, foot placement angles and level of experience on knee, hip and trunk motion and loading. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 10, 14.
- Mozafaripour, E., Seidi, F., Minoonejad, H., Mousavi, S. H., & Bayattork, M. (2021). Can lower extremity anatomical measures and core stability predict dynamic knee valgus in young men? *Journal of Bodywork and Movement Therapies*, 27, 358-363.
- Myer, G. D., Kushner, A. M., Brent, J. L., Schoenfeld, B. J., Hugentobler, J., Lloyd, R. S., Vermeil, A., Chu, D. A., Harbin, J., & McGill, S. M. (2014). The back squat: A proposed assessment of functional deficits and technical factors that limit performance. *Strength & Conditioning Journal*, 36(6), 4-27.
- 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.
- Saber, B., Bridger, D., & Agrawal, D. K. (2024). A critical analysis of the factors contributing to anterior cruciate ligament injuries in female athletes. *Journal of Orthopaedics and Sports Medicine*, 6(4), 203-209.
- Schoenfeld, B. J. (2010). Squatting kinematics and kinetics and their application to exercise performance. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 24(12), 3497-3506.
- Sendur, O. F., Gurer, G., Yildirim, T., Ozturk, E., & Aydeniz, A. (2006). Relationship of Q angle and joint hypermobility and Q angle values in different positions. *Clinical Rheumatology*, 25, 304-308.
- Senter, C., & Hame, S. L. (2006). Biomechanical analysis of tibial torque and knee flexion angle: implications for understanding knee injury. *Sports Medicine*, 36, 635-641.
- Shambaugh, J. P., Klein, A., & Herbert J. H. (1991). Structural measures as predictors of injury basketball players. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 23(5), 522-527.
- Slater, L. V., & Hart, J. M. (2017). Muscle activation patterns during different squat techniques. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 31(3), 667-676.
- Smith, T. O., Davies, L., O'Driscoll, M. L., & Donell, S. T. (2008). An evaluation of the clinical tests and outcome measures used to

assess patellar instability. *The Knee*, 15(4), 255-262.

Song, H. K., & So, J. M. (2019). Biomechanical analysis on change of toe-out angle in squat. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 29(3), 185-196.

Swinton, P. A., Lloyd, R., Keogh, J. W., Agouris, I., & Stewart, A. D. (2012). A biomechanical comparison of the traditional squat, powerlifting squat, and box squat. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 26(7), 1805-1816.

Zawadka, M., Smolka, J., Skublewska-Paszkowska, M., Lukasik, E., & Gawda, P. (2020). How are squat timing and kinematics in the sagittal plane related to squat depth? *Journal of Sports Science & Medicine*, 19(3), 500.

성인여성의 자가체중 스쿼트 시 발 각도의 조절이 무릎 안정성과 동작 수행 능력에 미치는 영향

김찬기¹, 정요한², 현원빈², 이형우¹, 전경규^{3*}

¹인천대학교 체육학과, 박사수로

²인천대학교 체육학과, 석사과정

³인천대학교 스포츠과학부, 부교수

*교신저자: 전경규(jeonkay@inu.ac.kr)

[목적] 본 연구는 성인여성의 자가체중 스쿼트 시 발 각도의 조절이 하지 관절의 운동학적 변인에 미치는 영향을 분석하고, 운동학적 변인들 간의 상관관계 차이를 비교하여 발 각도 조절이 무릎 안정성 및 동작 수행 능력에 미치는 영향을 비교하고자 하였다.

[방법] 만 20세 이상의 건강한 성인여성 29명을 참가자로 모집하였고, 참가자들은 자가체중 스쿼트를 2가지 조건(발 각도 0°와 30°)을 각 5회씩 3세트를 수행하였다. 데이터 분석은 Cortex 8.0을 활용하였으며, 발 각도에 따른 하지 관절 각도 및 질량중심 높이의 비교는 대응표본 t검정을 활용하여 분석하였다. 또한 피어슨 상관계수를 활용하여 각 종속 변인간의 상관을 분석하였으며, 유의미한 상관관계를 보이는 변인 쌍에 한하여 Fisher의 Z 변환을 적용하여 차이를 분석하였다. 모든 통계적 유의 수준은 $p < .05$ 로 설정하였다.

[결과] 본 연구 결과 발 각도 0°에 비해 발의 외회전 각도 30°에서 엉덩 관절 외전, 무릎 관절 굴곡, 발목 외회전 각도가 유의미하게 증가하였으며($p < 0.05$), 무릎 외반 각도는 유의미하게 감소하였다($p < 0.05$). 그리고 발의 외회전 각도 30°에서 골반의 질량 중심의 수직 움직임 범위가 증가하여 스쿼트 깊이가 증가한 것으로 나타났다($p < 0.01$). 하지 관절 운동학적 변인들 간 상관관계 분석 결과 발 각도 조건 간 유의미한 차이는 발견되지 않았다.

[결론] 본 연구의 결과를 토대로 성인 여성의 자가체중 스쿼트 동작은 발의 외회전 각도 30°에서 무릎 외반 각도가 비교적 작게 나타나면서, 무릎 관절에 가해지는 부하가 감소되어 부상 및 손상의 잠재적 가능성이 낮아지며, 하지 관절의 자유도가 증가해 더 깊은 스쿼트가 가능해짐을 시사한다. 따라서 성인 여성의 자가체중 스쿼트는 발의 외회전 각도 30°로 조절하는 것이 무릎 안정성과 동작 수행 능력을 향상시킬 수 있는 중재 전략이 될 수 있을 것이다.

주요어

스쿼트, 동적 무릎 외반, 발 각도, 하지 관절 각도, 운동학