KJAB

Korean Journal of Applied Biomechanics 2024; 34(2): 45-52
http://dx.doi.org/10.5103/KJAB.2024.34.2.45
http://e-kjab.org eISSN 2093-9752

ORIGINAL

Relationship between Foot Morphology and Biomechanical Variables of the Lower Extremity Joints during Vertical Jump

수직점프 시 발의 형태학적 특징과 하지관절의 운동역학적 변인과의 관계

Seong Hun Park[1], Sang-Kyoon Park[2]

[1]Graduate School of Korea National Sport University, Seoul, South Korea
[2]Motion Innovation Center, Korea National Sport University, Seoul, South Korea

Received : 07 March 2024
Revised : 12 April 2024
Accepted : 12 April 2024

Corresponding Author
Sang-Kyoon Park
Motion Innovation Center/ Institute of Sport Science, Korea National Sport University, 1239, Yangjaedaero, Songpa-gu, Seoul, 05541, South Korea
Email : spark@knsu.ac.kr

Objective: The purpose of this study was to measure the morphological characteristics of the foot and biomechanical variables of the lower extremity joints during vertical jump and investigate the relationship between foot morphology and biomechanics of vertical jump.

Method: 24 men in their 20s (age: 22.42 ± 1.41 yrs, height: 173.37 ± 4.61 cm, weight: 72.02 ± 6.21 kg, foot length: 251.70 ± 8.68 mm) participated in the study. Morphological characteristics of the foot included the length of the first toe, the length of the second toe, and the horizontal length from the center of ankle joint to the achilles tendon (Plantar Flexion Moment Arm [PFMA]). Biomechanical variables were measured for plantar flexor strength of the ankle joint and peak angular velocity, moment, and power of the lower extremity joint during vertical jump.

Results: There was a significant correlation between the length of the first toe and plantar flexion strength at 30°/s [r=.440, p=.016], the angular velocity of the metatarsophalangeal [MTP] joint [r=-.369, p=.038] while significant correlations between PFMA and the angular velocities of the knee joint [r=.369, p=.038] and ankle joint [r=.420, p=.021] were found. There were also significant correlations between the length of the first toe and the maximum moment of the hip joint [r=.379, p=.034], and the length of the second toe and the power of the hip joint [r=-.391, p=.029]. Finally, significant correlations between PFMA and the power of the ankle joint [r=.424, p=.019] and MTP joint [r=.367, p=.039] were found.

Conclusion: Based on the results of this study, the length of the toe and PFMA would be related to the function of the lower extremity joint. Therefore, this should be considered when designing the functional structure of a shoe. Furthermore, this relationship can be applied to intensive training for the plantar flexors and toe flexors to improve power in athletic performance.

Keywords: Vertical jump, Toe, PFMA, Plantar flexion strength, Joint angular velocity, Joint moment, Joint power

Copyright © 2024 Korean Journal of Applied Biomechanics
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

INTRODUCTION

운동 수행능력에는 많은 요인이 영향을 미치는데 그 요인은 크게 지면, 신발 등의 외적 요인과 신체 길이, 근력, 심리적 요인 등의 내적 요인으로 구분할 수 있다(Kim & Lee, 2007; Taunton et al., 2002). 특히 하지의 근력이나 분절의 길이는 관절에서 발생되는 토크(torque)에 직접적으로 관여된다. 하지 관절 중 발목관절을 이루는 발 분절은 하지의 가장 말단으로 보행주기 중 push-off 단계에서 지면을 미는 역할을 수행하기 때문에 수행능력에 많은 영향을 미친다. 발의 형태학과 구조역학적 변화가 달리기 시 생체역학 및 전반적인 기능에 큰 영향을 미치지만(Elliot & Ackland, 1981; Krell & Stefanyshyn, 2006), 기존의 연구들에서는 간과되는 경향이 있었다(Baxter & Piazza, 2014; Lee & Ryu, 2019).

발 분절에서 추진과 관련된 주요한 변인은 발가락뼈와 발허리뼈가 해당되는 전족부(forefoot)의 모멘트암과 발목의 회전중심에서 아킬레스건(achilles tendon)까지의 모멘트암이 있다. 모멘트암이 길수록 관성모멘트(moment of inertia)가 커져 회전시키는데 더 큰 힘이 필요하지만, 큰 힘이 뒷받침된다면 기계적 이점을 이용해 결과적으로 더 큰 토크를 일으킬 수 있다. Baxter, Novack, Van Werkhoven, Pennell & Piazza (2012)는 자기공명영상(Magnetic Resonance Imaging [MRI]) 촬영을 통해 단거리 선수가 일반인에 비해 발목 회전중심에서 아킬레스건까지의 발바닥굽힘 모멘트암(Plantar Flexion Moment Arm [PFMA])이 더 짧다는 연구결과를 도출하였으며, Baxter와 Piazza (2014)는 발바닥굽힘 근육의 등척성(isometric), 등속성(isokinetic) 근력 측정을 통해 발목관절의 발바닥굽힘 토크와 모멘트암 간 상관관계를 규명하였고, 모멘트암이 관절토크의 강력한 예측변수라고 하였다. 또한 근감소증(sarcopenia)이 있는 노인이나, 근력을 더 향상시키기 어려운 최고 수준의 선수들은 보행속도를 결정할 때 모멘트암이 더 중요한 요인이 될 수 있다고 하였으며, 발목관절이 발바닥굽힘 할 때 MTP 관절의 굽힘토크도 큰 영향을 미치기 때문에 MTP 관절의 모멘트암과 토크를 측정해 볼 필요가 있다고도 하였다. Stefanyshyn와 Nigg (1997)은 달리는 동안 MTP 관절의 기계적 에너지 기여도에 대한 연구를 수행하였고, 그 결과 MTP 관절은 에너지 생성보다 흡수에 훨씬 큰 기여를 한다고 보고하였으며, 추후 MTP 관절에 대한 다방면의 연구가 필요하다고 하였다. 또 다른 선행연구에서는 단거리 선수가 일반인에 비해 첫 번째 발가락이 더 길다는 연구결과를 보고하였고(Baxter et al., 2012; Chen, Chang, Wang & Tsao, 2018; Tanaka et al., 2017; Ueno et al., 2018), Tanaka et al. (2017)의 연구에서는 첫 번째 발가락과 두 번째 발가락의 길이와 100 m 스프린트 기록 간의 관계를 분석하여 선수와 비 선수 간의 전족부 길이의 차이는 첫 번째, 두 번째 발가락 모두 유의하지만, 선수집단의 100 m 스프린트 기록과 전족부의 관계를 분석한 결과, 두 번째 발가락에서만 유의한 상관관계를 도출하였다.

수직점프는 달리기와 달리 순간적으로 발생되는 하지의 근력을 측정하는 방법으로 많이 활용된다(Vanezis & Lees, 2005). 스포츠 상황에서는 달리는 것뿐 아니라 순간적으로 파워를 내야 하는 순간이 많은데, 수직점프 능력에 대한 연구는 점프의 높이나 근력을 측정하는 것이 대부분이었으며, 각 관절의 역할이나 수행능력에 대한 연구는 매우 제한적이었다. 또한 수직점프와 달리기 수행능력의 연관성은 많은 연구에서 다뤄졌는데(Loturco et al., 2015; Marcote-Pequeño et al., 2019), 발 형태 역시 두 가지 운동을 수행할 때 비슷한 영향을 나타내는지 연구가 필요하다.

인체는 기계적 요소 외에 많은 외적 요소가 개입되기 때문에 시뮬레이션이 아닌 인간을 대상으로 한 연구가 필요하고(Baxter & Piazza, 2014), 이전 연구에서 발의 형태나 발목관절의 근력 등의 요소를 비교하는 연구들은 있었지만, 실제 동작을 수행하는 상황에서 운동학, 운동역학적 변인을 측정한 연구는 제한적이었다. 따라서 수직점프 시 관절의 운동학, 운동역학적 변인을 직접 측정하고 발의 형태학적 특징과의 상관관계를 확인해 볼 필요가 있다.

METHOD

1. 연구대상

본 연구에는 6개월 이내에 하지 근골격계에 상해가 없고 오른발 잡이이며, 260~270 mm 사이즈의 운동화를 착용하는 20대 남성 24명(나이: 22.42±1.41 yrs, 키: 173.37±4.61 cm, 몸무게: 72.02±6.21 kg, 발 길이: 251.70±8.68 mm)이 대상자로 참여하였다. 모든 피험자들은 실험에 참여하기 전 실험과정에 대한 설명을 하고 참여의사와 동의서를 받았으며, 본 연구는 한국체육대학교 생명윤리위원회의 승인을 받은 후 진행하였다(IRB 승인번호: 20230621-079).

2. 측정방법

본 연구는 다음과 같은 측정절차를 통해 진행되었다(Figure 1). 발의 형태학적 특징은 첫째 둘째 발허리뼈 머리, 바깥 복사뼈 중심을 촉진하여 랜드마크를 표시한 후, 3D foot scanner (MS320F, MediACE, Korea)를 활용하여 발의 3D 이미지를 취득하였다. 그 후 취득한 이미지를 Kinovea (ver. 0.9.5, USA) 프로그램을 통해 첫 번째 발가락의 길이와 두 번째 발가락의 길이, 발목중심에서 아킬레스건까지의 수평 길이(PFMA)를 산출하였다(Figure 2). 산출된 길이는 개인별 발 전체 길이 대비 비율로 정규화하였다.

대상자의 발바닥굽힘 근력을 측정하기 위해 등속성 및 등척성 근력을 측정할 수 있는 근력 측정장비(HUMAC NORM, CSMI, USA)를 사용하였다(Figure 3). 등척성, 등속성 근력은 가장 높은 값(peak torque, Nm)을 사용하였으며, 등속성 근력은 CSMI 사에서 제안한 매뉴얼을 참고하여, 30°/s, 120°/s, 180°/s, 세 가지 각속도에서의 데이터를 취득하였다. 측정은 각각 5회, 3세트씩 실시하였으며, 각 세트마다 30초, 각 속도마다 60초의 휴식시간을 부여하였다(Rannama, Port, Bazanov & Pedak, 2015). 또한 측정 시 최대 근력을 발휘할 수 있도록 육성으로 청각적 피드백을 주어 동기부여를 유발하였다.

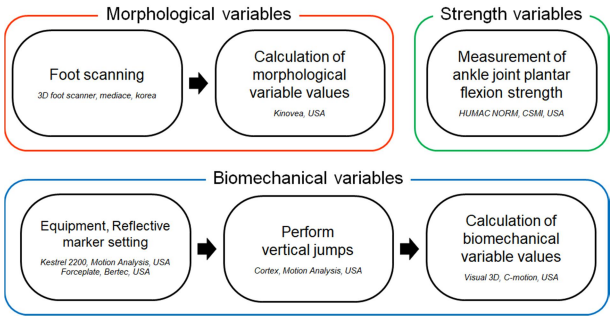

Figure 1. Experimental procedure.

수직점프 시 하지관절의 운동역학적 데이터를 취득하기 위해 적외선카메라(Kestrel 2200, Motion Analysis, USA) 8대와 지면반력기(Bertec, USA)를 설치하였으며, 샘플링율(sampling rate)은 적외선카메라는 100 Hz, 지면반력기는 1,000 Hz로 각각 설정하였다. 전역좌표계는 NLT (non-linear transformation) 방법으로 설정하였으며 축 정의는 X 축은 좌(–)우(+), Y 축은 전 (+)후(–), Z 축은 수직(+) 방향으로 설정하였다.

공간좌표 산출을 위해 대상자의 하지관절에 총 33개의 반사마커를 부착하였고, 대상자의 신발(Pegasus 40, Nike)은 모두 동일하게 통제하였으며 충분한 준비운동 후 지면반력기 위에서 총 3번의 수직점프를 수행하였다. 이때 상체의 반동을 이용하지 않도록 양손은 가슴 앞으로 교차한 상태로 통제하였다(Figure 3). 수직점프 수행 중 무릎관절이 최대 굴곡된 시점부터 점프 시 발이 떨어지는 구간까지를 분석하였고, 3회

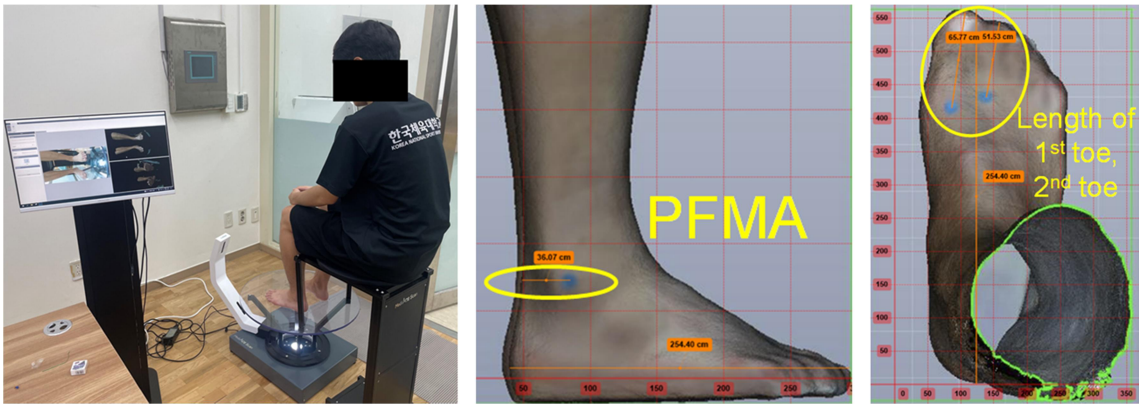

Figure 2. Method for measuring morphological characteristics.

Figure 3. Marker setting and Procedure of ankle joint strength test, vertical jump

측정값의 평균값을 산출하였다.

3. 자료처리

본 연구에서는 발의 형태학적 특징의 길이는 Kinovea 프로그램을 통하여 산출하였고, 수직점프 시 운동역학적 데이터는 Cortex 9.0 (Motion Analysis, USA)를 통하여 수집하였으며, Visual 3D (C-motion, USA)를 통해 엉덩관절, 무릎관절, 발목관절, MTP 관절의 최대 각속도, 모멘트, 파워를 산출하였다. 이 때 관절각도의 방향정의는 엉덩관절, 무릎관절은 폄(+)굽힘(–), 발목관절은 발바닥굽힘(+)발등굽힘(–), MTP 관절은 굽힘(+)폄(–)으로 설정하였다. 취득과정에서 발생하는 오차(random error)를 최소화하기 위하여 2차 저역통과 필터(Butterworth 2nd order low-pass filter)를 사용하였으며, 이때 필터의 차단주파수는 운동학 데이터는 10 Hz, 운동역학 데이터는 100 Hz로 각각 설정하였다.

4. 통계분석

본 연구의 통계처리는 SPSS 22.0 (IBM, USA)을 이용하여 발의 형태학적 변인(첫 번째 발가락의 길이, 두 번째 발가락의 길이, PFMA)와 발목관절 근력, 하지관절의 운동역학적 변인(엉덩, 무릎, 발목, MTP 관절의 최대 각속도, 모멘트, 파워)과 상관분석을 실시하였다. 분석 전 모든 변인에 대해 Kolmogorov-Smirnov 정규성 검정을 실시하였고, MTP 관절의 최대 모멘트 외에 모든 변인이 정규성을 만족하였다. 상관분석은 두 변인 모두 정규성을 만족했을 시 Pearson 상관분석을 실시하고, 한 변인이나 두 변인 모두 만족하지 못했을 시 Spearman 상관분석을 실시하였으며 유의수준은 α=.05로 설정하였다. 분석결과로 산출된 상관계수를 통해 상관 정도를 확인하였으며, 상관관계의 강도는 Rea와 Parker (2014)의 기준으로 설정하였다.

RESULTS

1. 각 변인 측정결과

발의 형태학적 변인과 발목관절의 발바닥굽힘 근력, 하지관절의 수직점프 시 운동역학적 변인의 각 측정결과는 <Table 1>과 같다. 발의 형태학적 변인은 개인별 발 전체 길이 대비 비율로 정규화하였고, 하지관절의 각속도, 모멘트, 파워는 분석구간의 최댓값을 산출하였다.

Table 1. Results of morphological variables of the foot and biomechanical variables of the lower extremity joints

Variables	Value (n=24)
Foot length (mm)	251.7±8.68
1st toe (mm)	69.03±4.42
% Foot length	27.43±1.51
2nd toe (mm)	62.94±4.55
% Foot length	25.02±1.76
PFMA (mm)	41.39±5.13
% Foot length	16.41±1.71
Ankle joint plantar flexion strength (Nm)	
30 Deg/s	137.79±25.12
120 Deg/s	87.83±26.40
80 Deg/s	72.50±18.44
Isomentric contraction	162.63±31.00
Peak angular velocity (Deg/s)	
Hip joint	202.84±64.44
Knee joint	414.36±136.94
Ankle joint	714.61±211.73
MTP joint	246.18±103.39
Peak Joint moment (Nm/kg)	
Hip joint	1.46±0.53
Knee joint	2.10±0.66
Ankle joint	0.13±0.03
MTP joint	0.03±0.01
Peak joint power (W/kg)	
Hip joint	17.29±5.86
Knee joint	20.74±5.64
Ankle joint	8.36±4.77
MTP joint	10.14±9.20

PFMA: Plantar Flexion Moment Arm, FL: Foot Length
Hip, Knee: Extension(+)/Flexion(–), Ankle: Plantar flexion(+)/Dorsiflexion(–), MTP: Flexion(+)/Extension(–)

2. 발의 형태학적 변인과 발목관절 발바닥굽힘 근력의 상관관계

발의 형태학적 변인과 발목관절 발바닥굽힘 근력의 상관관

Table 2. Correlations between morphological variables of the foot and plantar flexion strength of ankle joint

r (*p* value)

Morphological variables	30 Deg/s	120 Deg/s	180 Deg/s	Isometric
1st toe	**.409 (.024)***	.038 (.430)	.198 (.177)	.324 (.061)
2nd toe	.196 (.179)	-.078 (.358)	-.029 (.447)	.221 (.150)
PFMA	-.007 (.487)	-.097 (.326)	.096 (.328)	.130 (.279)

*: Indicate significant correlation (p<.05), PFMA: Plantar Flexion Moment Arm

Table 3. Correlations between morphological variables of the foot and biomechanical variables of the lower extremity joints

r (*p* value)

Correlations	Morphological variables	Biomechanical variables			
		Hip joint	Knee joint	Ankle joint	MTP joint
Angular velocity	1st toe	-.099 (.323)	-.228 (.142)	-.282 (.091)	**-.369 (.038)***
	2nd toe	-.098 (.324)	-.298 (.079)	-.294 (.082)	-.319 (.065)
	PFMA	.251 (.118)	**.369 (.038)***	**.420 (.021)***	.237 (.133)
Joint moment	1st toe	**.379 (.034)***	-.099 (.322)	-.314 (.068)	.144 (.327)
	2nd toe	.150 (.242)	-.171 (.212)	-.127 (.277)	.024 (.270)
	PFMA	.066 (.379)	.075 (.364)	-.041 (.425)	.178 (.232)
Joint power	1st toe	-.235 (.135)	-.213 (.158)	.160 (.228)	-.148 (.245)
	2nd toe	**-.391 (.029)***	-.280 (.093)	.188 (.190)	-.183 (.196)
	PFMA	.192 (.184)	.167 (.218)	**.424 (.019)***	**.367 (.039)***

*: Indicate significant correlation (p<.05), PFMA: Plantar Flexion Moment Arm

계를 분석한 결과는 <Table 2>와 같다. 첫 번째 발가락의 길이와 30 Deg/s에서의 발바닥굽힘 근력은 비교적 강한 상관관계가 나타났으며(p<.05), 나머지 변인들 간의 상관관계는 통계적으로 유의하지 않았다.

3. 발의 형태학적 변인과 수직점프 시 하지관절 최대 각속도, 모멘트, 파워의 상관관계

발의 형태학적 변인과 수직점프 시 하지관절의 최대 각속도, 모멘트, 파워와의 상관관계를 분석한 결과는 <Table 3>와 같다. 최대 각속도에서는 첫 번째 발가락의 길이와 MTP 관절, 그리고 PFMA와 무릎관절에서 보통의 상관관계가 나타났고, 발목관절에서 비교적 강한 상관관계가 나타났다. 최대 모멘트에서는 첫 번째 발가락의 길이와 엉덩관절에서 보통의 상관관계가 나타났으며, 최대 파워에서는 두 번째 발가락과 엉덩관절, 그리고 PFMA와 MTP 관절에서 보통의 상관관계가 나타났고, PFMA와 발목관절에서 비교적 강한 상관관계가 나타났다(Figure 4).

DISCUSSION

달리기나 점프 시 긴엄지굽힘근과 긴발가락굽힘근은 추진구간에서 크게 활성화되며 발가락을 뗄 때 최종 추진력을 전달하는데(Moore, Dalley & Agur, 2013; Standring, 2009), 본 연구에서는 발의 형태학적인 요인과 수직점프 시 하지관절의 운동역학적 요인 간의 상관성을 정량적으로 확인함으로써 발의 형태가 하지관절의 추진능력에 미치는 영향을 확인하고자 하였다.

선행연구에서 긴엄지굽힘근은 하퇴에서 적은 면적을 차지하지만, 힘 생산은 외측 비복근의 70%나 된다고 보고하였다(Fukunaga et al., 1992; Ward, Eng, Smallwood & Lieber, 2009). 또한 Péter, Hegyi, Finni & Cronin (2017)은 근전도 분석을 통해 긴엄지굽힘근이 내측 비복근과 유사한 신경 역학적 패턴을 보인다고 보고하였다. 발가락굽힘근들은 하퇴근육층의 심

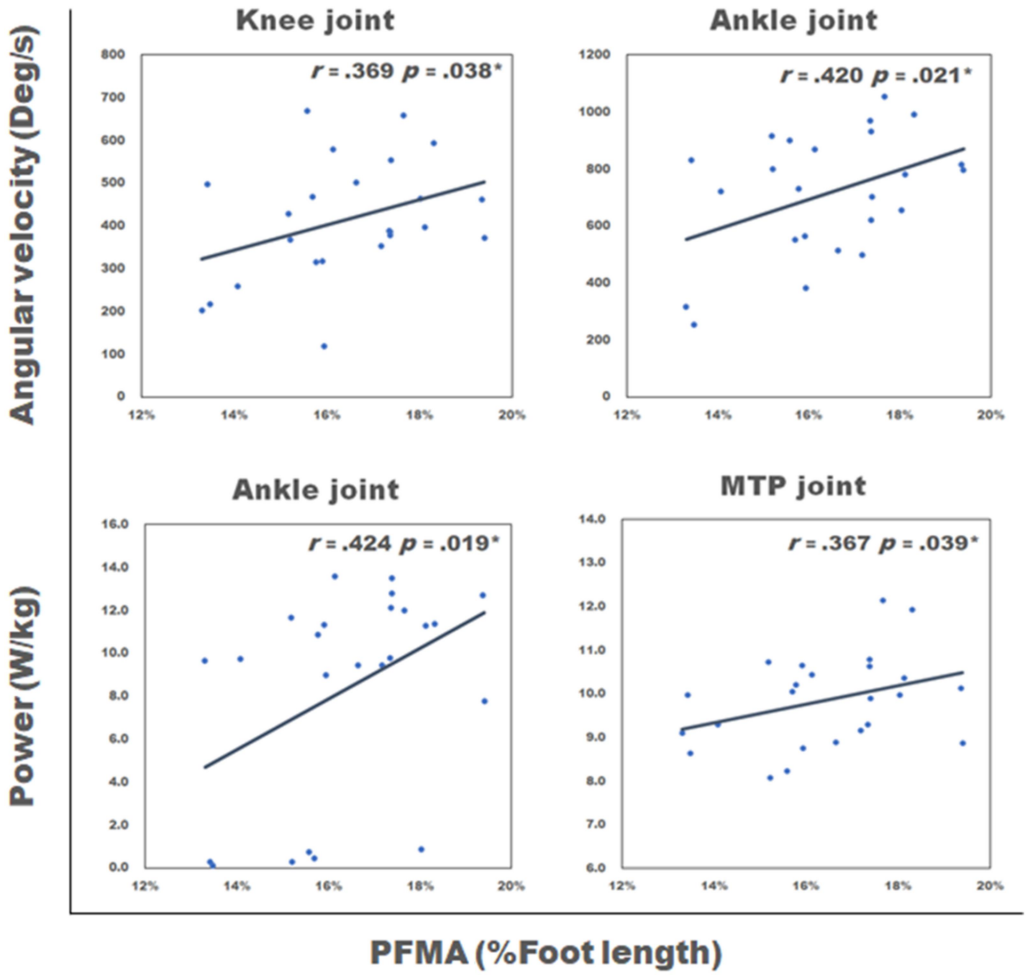

Figure 4. Correlations between PFMA and lower extremity joint angular velocity and power

부에 위치하여 표면근전도 측정으로 개별적인 근육의 근활성도를 파악하기 어렵다. 따라서 HUMAC 기기를 활용하여 발목관절의 발바닥굽힘 근력을 측정하는 것은 발바닥굽힘에 가장 크게 기여하는 비복근을 비롯하여 심부에 위치한 발가락 굽힘근들의 근력도 간접적으로 확인할 수 있는 방법으로 고려될 수 있다.

본 연구에서는 등속성 발바닥굽힘 근력의 경우 각속도가 빨라질수록 근력이 낮아지는 결과를 보였다. 힘-속도 곡선에 의해 근육의 단축속도가 빨라질수록 단축성 수축은 힘이 줄어드는데(Lindstedt, 2016), 24명의 피험자 중 22명이 등척성 근력이 가장 크고, 각속도가 빨라질수록 근력이 낮아지는 양상을 보여 이론을 뒷받침할 수 있는 연구결과를 보였다. 상관관계의 경우 PFMA는 약한 정적 상관관계를 보인 등척성 근력을 제외한 등속성 근력에서는 상관관계를 거의 보이지 않은 반면, 첫 번째 발가락과 두 번째 발가락은 30˚/s 각속도에서의 근력과 등척성 근력에서 보통 또는 비교적 강한 정적 상관관계를 보였으며, 그 중 첫 번째 발가락과 30˚/s에서의 등속성 근력과의 상관관계는 통계적으로 유의하였다. Baxter et al. (2012)의 연구에서는 발목관절의 발바닥굽힘 힘으로 벽을 미는 컴퓨터 시뮬레이션을 진행하여 긴 앞발 비율은 벽에 대한 발 접촉시간을 증가시켜 더 큰 힘을 사용할 수 있다고 보고하였으며, Lee & Piazza (2009)는 컴퓨터 시뮬레이션 결과 발가락 길이가 65 mm에서 90 mm로 증가함에 따라 전방으로의 추진력이 증가하였고 더 긴 발가락이 접촉시간을 증가시켜 질량중심의 가속을 위한 시간을 더 많이 확보한다는 결과와, 단거리 선수집단이 비 선수집단보다 PFMA가 평균적으로 25% 더 짧았다는 결과를 보고하였다. 본 연구에서도 첫 번째 발가락과 낮은 각속도에서의 발바닥굽힘 근력이 유의한 상관관계를 보여 선행연구들과 일치하는 결과가 도출되었다.

이러한 결과를 통해 추진력이 PFMA가 더 짧을수록 추진과 관련된 운동역학적 변인이 더 커질 것으로 생각될 수 있지만, 본 연구에서는 수직점프 시 PFMA와 무릎과 발목관절의 최대 각속도, 발목과 MTP 관절의 최대 양의 파워와 보통의 정적 상관관계를 보였으며, 특히 발목관절의 최대 각속도와 파워는 비교적 강한 정적 상관관계가 나타났다. 이는 선행연구에서 PFMA와 하퇴근육의 용적, PFMA와 발바닥굽힘 근력이 정적 상관관계를 보인 것과 유사한 결과라고 해석할 수 있다(Baxter & Piazza, 2014). 선행연구의 결과로 PFMA가 길다는 것은 결국 하퇴근육의 용적이 크다는 것을 의미하고, 더 큰 근육량은 더 큰 근력을 내어 하퇴근육의 용적이 클수록 발바닥굽힘 근력도 더 커진 것을 알 수 있다. 본 연구에서 PFMA가 길수록 발목관절의 각속도, 파워가 커진 것은 결국 PFMA가 긴 대상이 발바닥굽힘 시 근력이 더 컸다는 결과로 해석할 수 있다. 즉, 모멘트암이 가져오는 이점보다 근력이 우수한 것이 실제 동작을 할 때 수행능력을 높이는 것으로 생각된다.

또한 수직점프를 수행할 때 팔의 움직임은 통제하였지만 하지관절의 협응까지 통제할 수는 없었다. 점프를 수행할 때 발목, 무릎, 엉덩관절이 기여하는 비율은 사람마다 차이가 있는데(Kim, Seo & Han, 2012; Vanezis & Lees, 2005), 본 연구에서 하지관절의 양의 파워 비율을 보면 24명의 피험자 중 19명이 무릎관절의 기여도가 평균 43%로 가장 높았지만 피험자 24명 중 8명은 발목관절과 MTP 관절을 합친 기여도가 엉덩관절의 기여도보다 높았다. 이는 수직점프의 수행능력과 별개로 수행하는 전략이 개인마다 특성이 있다는 선행연구들의 결과와 일치한다. 또한 수직점프 시 각 하지관절이 최대 토크를 발휘하는 시점도 다르기 때문에(Farris, Lichtwark, Brown & Cresswell, 2016), 추후 연구에서는 수직점프 시 관절의 기여도나 타이밍 등 개인의 특성을 통제하거나 집단화하여 연구를 수행할 필요가 있다고 생각된다.

CONCLUSION

운동수행 능력에 기여하는 여러 가지 요소 중, 운동 시 지면을 미는 직접 역할을 수행하는 발가락과 발목관절이 회전할 때의 중심에서부터 길이의 역할도 파악하여 이론과 실제를 비교해 볼 필요가 있지만, 이에 대한 정량적인 운동역학적 연구는 미비한 실정이었다. 따라서 본 연구에서는 발가락의 길이와, 발목관절의 중심에서부터 아킬레스건까지의 길이가 수직점프 시 어떤 영향을 미치는지 정량적 자료를 제시하여 경기력 향상을 위한 훈련 프로그램이나 장비 개발에 기여하고자 하였다. 수직점프 시 첫 번째 발가락은 MTP 관절의 각속도, 엉덩관절의 모멘트와 유의한 상관관계를 보였고, PFMA는 무릎과 발목관절의 각속도, 발목과 MTP 관절의 파워와 유의한 상관관계를 보여, 수직점프 시 발의 형태는 하지관절의 수행능력과 관계가 있다고 해석할 수 있다. 하지만 본 연구에서 유의하게 나타난 상관관계들은 상관계수가 낮은 수준이었으며, 상관관계만으로는 인과관계를 설명할 수 없기 때문에 추후 인과관계를 분석하는 연구도 필요하다. 발가락과 PFMA의 길이가 하지관절의 기능과 관계가 있다는 본 연구의 결과를 바탕으로 신발의 기능적 구조를 설계할 때 발가락 길이와 기능을 고려된 전족의 디자인이 적용할 수 있겠다. 발가락이 위치한 Toe box를 더욱 추진에 효과적으로 디자인하거나, 또는 추진하는 수행능력을 키우기 위해 발바닥굽힘근, 발가락굽힘근 등을 집중적으로 훈련시키는데 활용할 수 있다고 생각된다.

ACKNOWLEDGEMENT

This study excerpted from Seong Hun Park's master thesis at Korea National Sport University.

REFERENCES

Baxter, J. R. & Piazza, S. J. (2014). Plantar flexor moment arm and muscle volume predict torque-generating capacity in young men. *Journal of Applied Physiology*, *116*(5), 538-544.

Baxter, J. R., Novack, T. A., Van Werkhoven, H., Pennell, D. R. & Piazza, S. J. (2012). Ankle joint mechanics and foot proportions differ between human sprinters and non-sprinters. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, *279*(1735), 2018-2024.

Chen, L. H., Chang, C. C., Wang, M. J. & Tsao, L. (2018). Comparison of foot shape between recreational sprinters and non-habitual exercisers using 3D scanning data. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *68*, 337-343.

Elliot, B. & Ackland, T. (1981). Biomechanical effects of fatigue on 10,000 meter running technique. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, *52*(2), 160-166.

Farris, D. J., Lichtwark, G. A., Brown, N. A. & Cresswell, A. G. (2016). The role of human ankle plantar flexor muscle-tendon interaction and architecture in maximal vertical jumping examined in vivo. *Journal of Experimental Biology*, *219*(4), 528-534.

Fukunaga, T., Roy, R. R., Shellock, F. G., Hodgson, J. A., Day, M. K., Lee, P. L. & Edgerton, V. R. (1992). Physiological cross-sectional area of human leg muscles based on magnetic resonance imaging. *Journal of Orthopaedic Research*,

10(6), 926-934.

Kim, T. S. & Lee, Y. J. (2007). Three Dimension Angle Change of the Trunk to the Muscular Endurance during a Prolonged Running. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, *17*(2), 61-73.

Kim, Y. W., Seo, J. S. & Han, D. W. (2012). Effect of Joint Kinetics and Coordination on the Within-Individual Differences in Maximum Vertical Jump. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, *22*(3), 305-314.

Krell, J. B. & Stefanyshyn, D. J. (2006). The relationship between extension of the metatarsophalangeal joint and sprint time for 100 m Olympic athletes. *Journal of Sports Sciences*, *24*(2), 175-180.

Lee, S. S. & Piazza, S. J. (2009). Built for speed: musculoskeletal structure and sprinting ability. *Journal of Experimental Biology*, *212*(22), 3700-3707.

Lee, Y. S. & Ryu, J. (2019). The Relationship between Anthropometric Parameters of the Foot and Kinetic Variables during Running. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, *29*(3), 173-183.

Lindstedt, S. L. (2016). Skeletal muscle tissue in movement and health: positives and negatives. *Journal of Experimental Biology*, *219*(2), 183-188.

Loturco, I., D'Angelo, R. A., Fernandes, V., Gil, S., Kobal, R., Abad, C. C. C. & Nakamura, F. Y. (2015). Relationship between sprint ability and loaded/unloaded jump tests in elite sprinters. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, *29*(3), 758-764.

Marcote-Pequeño, R., García-Ramos, A., Cuadrado-Peñafiel, V., González-Hernández, J. M., Gómez, M. Á. & Jiménez-Reyes, P. (2019). Association between the force–velocity profile and performance variables obtained in jumping and sprinting in elite female soccer players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *14*(2), 209-215.

Moore, K. L., Dalley, A. F. & Agur, A. M. (2013). *Clinically Oriented Anatomy.* Lippincott Williams & Wilkins.

Péter, A., Hegyi, A., Finni, T. & Cronin, N. J. (2017). In vivo fascicle behavior of the flexor hallucis longus muscle at different walking speeds. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, *27*(12), 1716-1723.

Rannama, I., Port, K., Bazanov, B. & Pedak, K. (2015). Sprint cycling performance and asymmetry. *Journal of Human Sport and Exercise*, *10*(1), S248-S258.

Rea, L. M. & Parker, R. A. (2014). *Designing and Conducting Survey Research: A Comprehensive Guide*. Fourth Edition. John Wiley & Sons, Inc.

Standring, S. (2009). *Gray's Anatomy: The Anatomical Basis of Clinical Practice*, Expert Consult. Aubrey Durkin.

Stefanyshyn, D. J. & Nigg, B. M. (1997). Mechanical energy contribution of the metatarsophalangeal joint to running and sprinting. *Journal of Biomechanics*, *30*(11-12), 1081-1085.

Tanaka, T., Suga, T., Otsuka, M., Misaki, J., Miyake, Y., Kudo, S. & Isaka, T. (2017). Relationship between the length of the forefoot bones and performance in male sprinters. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, *27*(12), 1673-1680.

Taunton, J. E., Ryan, M. B., Clement, D. B., McKenzie, D. C., Lloyd-Smith, D. R. & Zumbo, B. D. (2002). A retrospective case-control analysis of 2002 running injuries. *British Journal of Sports Medicine*, *36*(2), 95-101.

Ueno, H., Suga, T., Takao, K., Tanaka, T., Misaki, J., Miyake, Y. & Isaka, T. (2018). Association between forefoot bone length and performance in male endurance runners. *International Journal of Sports Medicine*, *39*(04), 275-281.

Vanezis, A. & Lees, A. (2005). A biomechanical analysis of good and poor performers of the vertical jump. *Ergonomics*, *48*(11-14), 1594-1603.

Ward, S. R., Eng, C. M., Smallwood, L. H. & Lieber, R. L. (2009). Are current measurements of lower extremity muscle architecture accurate?. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, *467*(4), 1074-1082.