KJSB Korean Journal of Sport Biomechanics 2019; 29(4): 255-261
http://dx.doi.org/10.5103/KJSB.2019.29.4.255
http://e-kjsb.org eISSN 2093-9752

ORIGINAL

Analysis of the Differences of the Shock Attenuation Strategy between Double-leg and Single-leg Landing on Sagittal Plane using Statistical Parametric Mapping

Statistical Parametric Mapping을 이용한 시상면에서의 양발 착지와 외발 착지의 전략 차이

Sunghe Ha[1,2,5], Sang-Kyoon Park[3,4], Sae Yong Lee[1,2,5]

[1]Integrative Sports Science Research Laboratory, Yonsei University, Seoul, South Korea
[2]School of Educational Science Physical Education, Yonsei University, Seoul, South Korea
[3]Motion Enovation Centre, Korea National Sport University, Seoul, South Korea
[4]Department of Health and Exercise Science, Korea National Sport University, Seoul, South Korea
[5]Yonsei Institute of Sports Science Exercise Medicine (IOC Research Center), Yonsei University, Seoul, South Korea

Received : 30 October 2019
Revised : 25 November 2019
Accepted : 25 November 2019

Corresponding Author
Sae Yong Lee
School of Educational Science Physical Education, Yonsei University, 50, Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul, 03722, South Korea
Tel : +82-2-2123-1689
Fax : +82-504-365-5497
Email : sylee1@yonsei.ac.kr

Objective: The purpose of this study was to investigate differences of shock attenuation strategies between double-leg and single-leg landing on sagittal plane using statistical parametric mapping.

Method: Nine healthy female professional soccer players (age: 24.0±2.5 yrs, height: 164.9±3.3 cm, weight: 55.7±6.6 kg, career: 11.2±1.4 yrs) were participated in this study. The subjects performed 10 times of double-leg and single-leg landing from the box of 30 cm height onto force plates respectively. The ground reaction force, angle, moment, angular velocity, and power of the ankle, knee, and hip joint on sagittal plane was calculated from initial contact to maximum knee flexion during landing phase. Statistical parametric mapping was used to compare the biomechanical variables of double-leg and single-leg landing of the dominant leg throughout the landing phase. Each mean difference of variables was analyzed using a paired t-test and alpha level was set to 0.05.

Results: For the biomechanical variables, significantly increased vertical ground reaction force, plantarflexion moment of the ankle joint, negative ankle joint power and extension moment of the hip joint were found in single-leg landing compared to double-leg landing (p<.05). In addition, the flexion angle and angular velocity of the knee and hip joint in double-leg landing were observed significantly greater than single-leg landing, respectively (p<.05).

Conclusion: These findings suggested that negative joint power and plantarflexion moment of the ankle joint can contribute to shock absorption during single-leg landing and may be the factors for preventing the musculoskeletal injuries of the lower extremity by an external force.

Keywords: Shock absorption, Postural control, Time series, Load accommodation, Biomechanics

INTRODUCTION

운동 동작에서 인간의 움직임은 걷기, 달리기, 점프, 방향전환, 착지 등이 나타난다. 점프 후에는 반드시 착지가 나타나는데 이는 멈추거나 연속된 동작을 수행하기 위해 중요한 과정이다. 착지 전략은 크게 넓은 기저면을 확보할 수 있는 안정적이며 충격분산에 효율적인 양발 착지 전략과 상대적으로 불안정한 외발 착지 전략이 있다(Heebner et al., 2017; Yeow, Lee &

Copyright © 2019 Korean Journal of Sport 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.

Goh, 2011). 양발 착지가 외발 착지보다 손상예방을 위한 접근에서 이득이더라도 역동적이고 예측 불가능한 스포츠 상황에서는 외발 착지의 형태가 주로 관찰되며 더불어 손상도 외발 착지 시 빈번히 나타나는 것으로 보고된다(Dai, Herman, Liu, Garrett & Yu, 2012; Grassi et al., 2017; Boden, Torg, Knowles & Hewett, 2009; Frobell et al., 2008; Meyer & Haut, 2005).

경기 중 발생된 손상의 13~42%는 하지에서 나타나며(Engebretsen et al., 2010; Soligard et al., 2017; Steffen et al., 2017) 특히 여성선수의 하지관절 손상 발생율이 남성선수에 비해 높게 관찰된다(Arendt, Agel & Dick, 1999; Ireland, 1999). 대표적인 예로 전방십자인대 손상이 있으며 원인으로는 발이 지면에 접촉될 때 발생되는 지면반력, 뻣뻣한 착지자세 등이 보고된다(Hewett et al., 2005; Yu & Garrett, 2007). 그러나 여성을 대상으로 한 착지 형태에 따른 전략 차이에 대한 연구는 미비한 실정이다(Yeow et al., 2011). 착지는 신체의 원위부가 지면에 고정된 폐쇄 운동 사슬(closed kinetic chain)의 형태로 하지의 각 분절 및 관절 간 영향을 주기 때문에 양발 착지와 다른 외발 착지의 전략의 차이를 이해할 필요가 있다.

시간의 흐름에 따른 동작의 변화를 관찰하는 시계열분석(time series analysis)은 착지동안 하지관절의 움직임을 모두 관찰할 수 있는 장점이 있으며, 특정 시점을 분석하여 관찰하는 분석방법의 단점을 보완할 수 있다(Ryu, 2014). 특정 시점의 분석은 차이가 나타나더라도 분석 시점이 아닌 경우 보고되지 못하거나 보완된 방법으로 최댓값과 최솟값을 보고하지만 그 시점이 보고되지는 않는다. 연구를 통해 명확한 시점이 제시된다면 근신경 전기 자극 훈련(neuromuscular electrical stimulation training)과 같은 형태의 훈련에 근육 동원되어야 하는 시점에 대한 정보를 제공할 수 있으므로 시점분석과 더불어 시계열분석에 대한 접근이 필요하다(Lategan, Crafford, Suliman, & Govender, 2014).

여성의 하지 손상 예방을 위한 착지 전략 및 예방운동 프로그램의 근거를 마련하기 위한 연구가 지속적으로 수행되고 있다(Myer, Ford, Brent & Hewett, 2006; Padua et al., 2015; Pfile et al., 2013). 착지 형태에 대한 차이(Dingenen et al., 2015)뿐만 아니라 충격흡수를 위한 여성의 착지 전략에 대한 시계열적 분석을 통한 차이를 전반적으로 관찰할 필요가 있다. 따라서 본 연구의 목적은 여성선수의 외발 착지와 양발 착지의 시상면에서 충격흡수 전략의 차이를 시계열적 통계분석을 통해 비교하는 것이다. 본 연구의 가설은 양발 착지와 외발 착지 전략에 있어 초기 착지 시점과 최대 수직 지면반력 시점 사이에서 하지관절의 운동학적, 운동역학적 착지 전략의 차이가 나타날 것으로 설정하였다.

METHOD

1. 연구대상자

본 연구의 대상자는 실업팀 여자 축구선수 9명(나이: 24.0±2.5 yrs, 신장: 164.9±3.3 cm, 체중: 55.7±6.6 kg, 경력: 11.2±1.4 yrs)으로 최근 6개월 간 하지관절에 손상 경험이 없는 엘리트 선수가 참가하였다. 모든 대상자에게 실험 참가 전 절차에 대한 설명을 충분히 한 후, 자발적 참여 동의서를 받아 연구를 수행하였다.

2. 연구절차

외발 착지와 양발 착지 동작의 비교를 위해 30 cm 높이의 박스에서 착지 동작을 수행하였다(Koo, Maeng & Yang, 2019). 대상자는 박스에 올라가 준비하고 시작 신호 후 양발로 가볍게 점프하여 지면반력기 중앙에 주동측 발이 전족 착지하도록 요청되었다. 착지 동작에 팔의 영향을 배제하기 위하여 양팔을 가슴에 엇갈려 올려놓은 채 착지하도록 하였고, 박스와 지면반력기 사이 거리는 35 cm로 설정하였다(Ha & Park, 2018; Myer, Ford, Khoury, Succop & Hewett, 2011). 착지 동작 배정은 랜덤하게 주어졌으며 동작 당 10회씩 실시하였고 자료분석을 위해 유효한 3회의 자료를 각각 수집하였다. 피로가 관찰 변인에 영향을 미치지 않도록 실험 중 대상자에게 충분한 휴식을 취하도록 하였다. 시작 신호 이외의 언어적 피드백은 제공하지 않았다.

착지 동작분석을 위한 골반과 주동측 하지의 모델링을 위해 Visual 3D (C-motion, USA) 마커셋을 사용하였다. 25개의 반사마커는 엉치뼈, 양측 엉덩뼈능선, 큰돌기, 위앞엉덩뼈가시, 위뒤엉덩뼈가시, 안쪽/바깥쪽 넙다리뼈 위관절융기, 안쪽/바깥쪽 복사뼈, 첫 번째 발허리뼈 머리, 다섯 번째 발허리뼈 머리/융기, 두 번째 쐐기뼈에 부착하였고, 양측 넙다리와 종아리에 클러스터(마커 4개로 구성된 판)를 각각 부착하였다. 이후 대상자에게 준비운동과 각 동작분석 시작 전 3회 박스 착지 연습을 제공하였다. 운동학적 운동역학적 분석을 위해 적외선 카메라(Oqus 300, Qualysis, Sweden) 8대, 지면반력기(Type 9286AA, Kistler, Switzerland) 1대를 사용하였다. 샘플링률은 마커자료 250 Hz와 지면반력 자료 2,500 Hz로 설정하였다. 실공간은 비선형변환(non-linear transformation) 방법을 이용하여 좌표화하였고, 인체움직임을 계산하기 위해 각 분절 중심에 지역좌표를 설정하였다. 지면반력은 Fx는 우(+)·좌(-)방향, Fy는 전(+)·후(-) 방향, Fz는 수직 상방을 (+)로 설정하였다. Qualysis Track Manager (Qualysis, Sweden) 소프트웨어를 이용해 통제하고 자료를 동조하여 수집하였다.

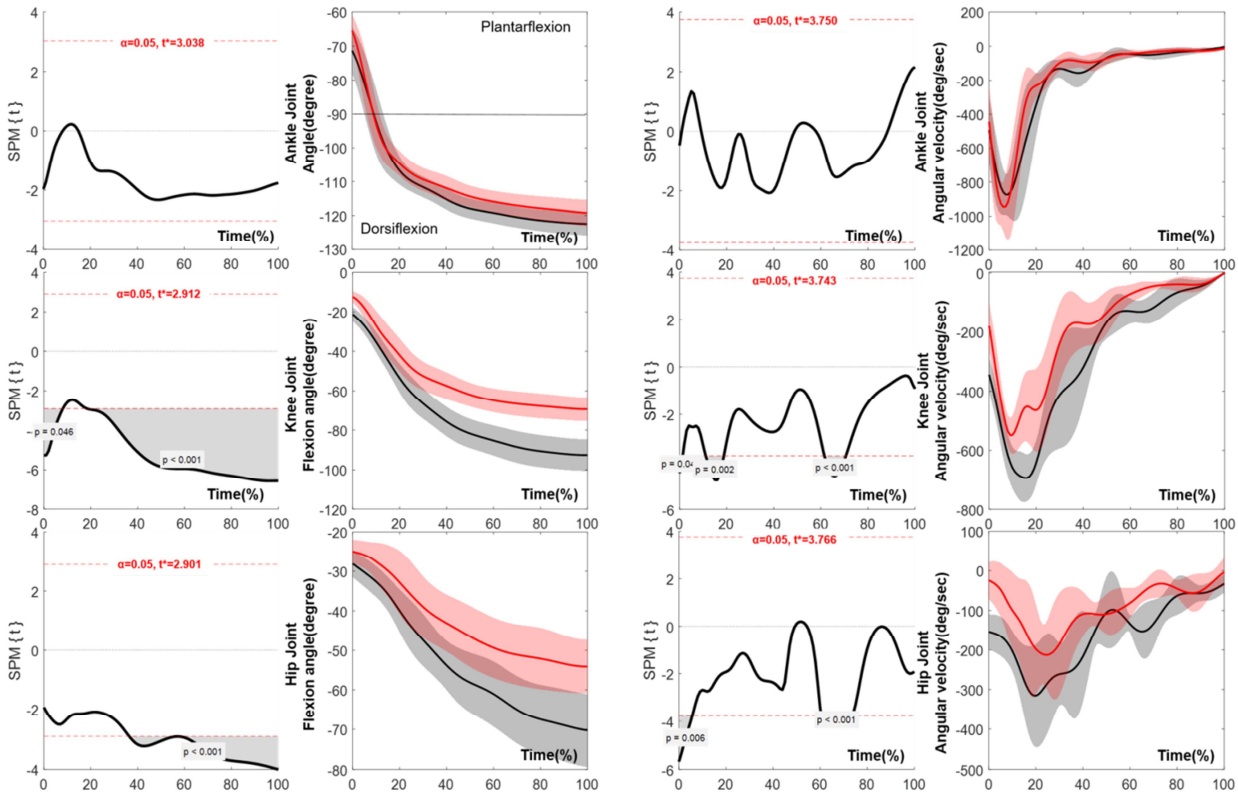

Figure 1. The mean differences of the joint angle and angular velocity between double-leg (black) and single-leg (red) landing. When the SPM{t} is greater than t*is shown a statistically significant difference between landings.

3. 자료처리

수집된 모든 대상자의 마커 및 지면반력 데이터는 Visual3D v6를 통해 자료 처리 및 변인을 산출하였다.

모든 마커자료는 저역통과필터(Butterworth 2nd bi-direction low-pass filter)를 사용해 차단주파수(cut-off frequency) 12 Hz (Ford, Myer & Hewett, 2007)로, 지면반력 자료는 100 Hz로 노이즈를 제거하였다(Sell et al., 2007). 운동학적 변인으로 관절각(degree)과 각속도(deg/sec), 운동역학적 변인으로 관절 모멘트(Nm/kg), 관절 일률(W/kg), 지면반력(N/BW)을 산출하였다. 관절 모멘트는 역동역학 방법을 통해 산출되었고, 관절 일률은 각속도와 관절 모멘트의 곱으로 정의되었다. 지면반력은 몸무게로 표준화하여 제시하였다.

분석구간은 수직 지면반력 자료가 20 N 이상 관찰될 때인 초기 착지 시점부터 무릎관절의 굴곡각이 최대인 시점으로 설정하여 소요된 구간별 프레임을 구간별 소요시간으로 나누어 백분율로 표기하였다.

4. 통계처리

양발 착지와 외발 착지 간 변인의 시간 순서에 따른 착지구간 내 모든 시점의 차이를 검증하기 위해 운동학적, 운동역학적 변인을 SPM1D (one-dimensional statistical parametric mapping)를 사용하여 대응표본 *t* 검증(paired *t*-test)을 실시하였다 (Pataky, Robinson & Vanrenterghem, 2016). 이때 유의수준은 α=.05로 설정하였고, 통계분석을 위해 matlabR2019a (MathWorks, USA) 소프트웨어를 사용하였다.

RESULTS

외발 착지 시 무릎관절의 굴곡각은 양발 착지 시 보다 1~9, 20% 이후 구간(t=-2.916, p<.05, p<.001)에서 작게 관찰되었고, 엉덩관절의 굴곡각 역시 38% 이후 구간에서 작게 나타났다 (t=-2.901, p<.001, Figure 1). 무릎관절 각속도는 1, 2, 13~19, 63~71% 구간(t=-3.743, p<.05, p<.05, p<.001)에서 외발 착지가 양발 착지보다 굴곡 각속도가 통계적으로 유의하게 작게 나타났고, 엉덩관절의 각속도 또한 1~6%와 62~74% 구간에서 통계적으로 작게 관찰되었다(t=-3.766, p<.05, p<.001, Figure 1).

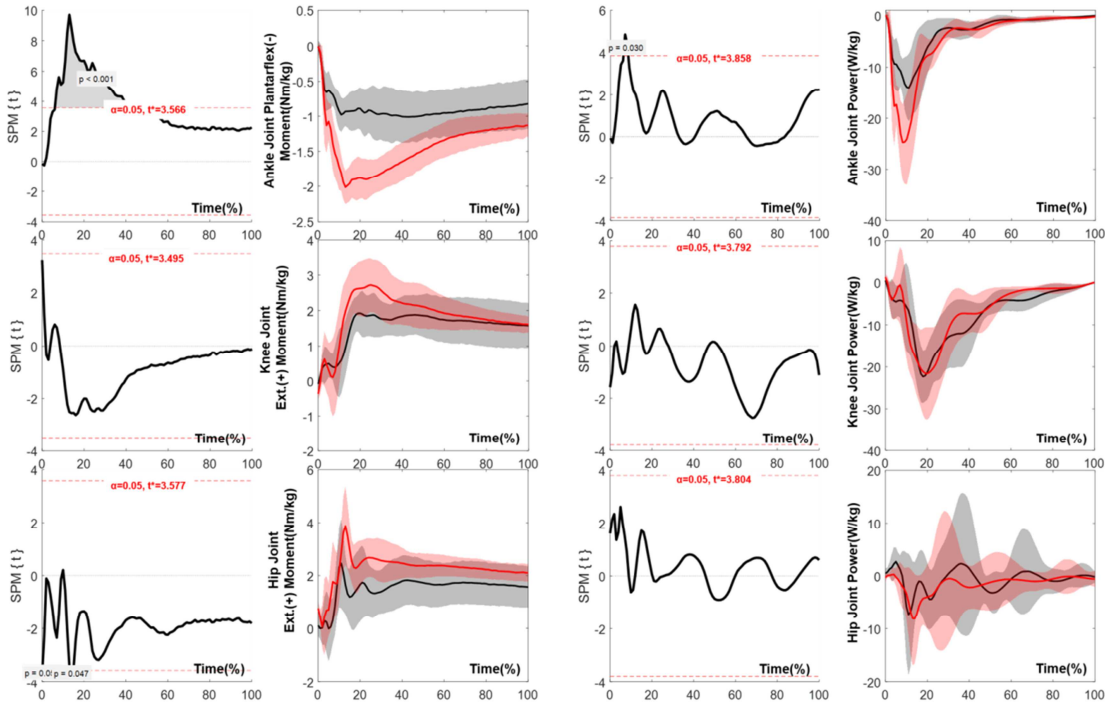

Figure 2. The mean differences of the joint moment and joint power between double-leg (black) and single-leg (red) landing. When the SPM{t} is greater than t*is shown a statistically significant difference between landings.

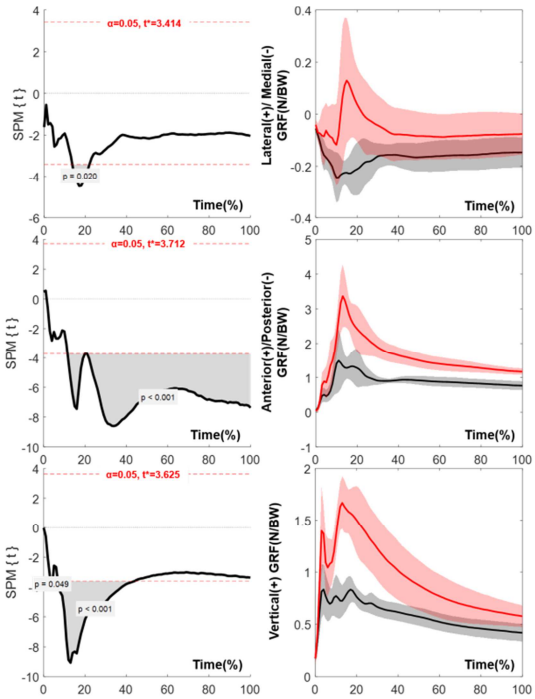

Figure 3. The mean differences of the ground reaction force between double-leg (black) and single-leg (red) landing. When the SPM{t} is greater than t*is shown a statistically significant difference between landings.

발목관절에서 저측굴곡 모멘트는 착지구간의 8~46%에서 외발이 양발 착지보다 통계적으로 크게 나타났고(t=3.5662, p<.001), 부적 관절 일률은 8~9%에서 크게 관찰되었다(t=3.858, p=.03, Figure 2). 엉덩관절에서는 초기 착지 시점과 15% 때 외발 착지 시 신전 모멘트가 양발 착지보다 크게 나타났다(t=3.577, p=.05, p<.05, Figure 2).

내외측 지면반력은 양발 착지 시 내측으로 나타난 반면 외발 착지 시 15~22% 구간에서 통계적으로 유의하게 외측으로 관찰되며 차이가 나타났다(t=3.414, p=.02, Figure 3). 전방 지면반력은 외발 착지 시 13%부터 무릎관절각의 최대 굴곡 시점까지 양발 착지보다 크게 관찰되었다(t=3.712, p<.001, Figure 3). 수직 지면반력은 외발 착지 시 4% 시점과 7~43% 구간에서 양발 착지에 비해 통계적으로 크게 관찰되었다(t=3.6253, p=.05, p<.001, Figure 3).

DISCUSSION

본 연구결과 양발 착지와 외발 착지에서 각각 발이 지면에 닿으며 관찰되는 첫 번째 수직 지면반력 정점(toe-strike)은 착지구간의 4%, 3%에서 나타났고 체중이 지지되며 관찰되는 두 번째 수직 지면반력 정점(weight acceptance)은 17%, 13%에서 나타났다. 전방 지면반력은 착지구간의 13% 이후, 수직 지

면반력은 4%와 7~43%에서 외발 착지가 양발 착지에 비해 크게 관찰되어 무릎관절(tibiofemoral joint)의 압박(compression) 증가로 하지 손상의 위험이 증가하게 된다(Shimokochi, Ambegaonkar, Meyer, Lee & Shultz, 2013). 실제 핸드볼과 농구경기 중 발생된 비접촉성 전방십자인대 손상을 분석한 연구에 따르면 외발 착지 후 40 ms 지난 시점에 손상이 나타났으며 이 시점의 수직 지면반력이 체중의 3.2배 수준으로 관찰 보고되었다(Olsen, Myklebust, Engebretsen & Bahr, 2004). 또한 무릎관절의 굴곡각은 1~9% 구간에서 외발 착지(12.38~23.24 degree)가 양발 착지(21.20~31.82 degree)보다 통계적으로 유의하게 작게 관찰되었다. 이는 선행연구의 결과에서 착지 시 외발 착지가 양발 착지에 비해 관절가동범위가 작게 보고된 바와 같이 뻣뻣하게 착지하는 형태가 착지 초반에 관찰되었다(Yeow et al., 2011). 양발 착지와 달리 외발 착지 시 제한된 관절가동범위는 착지 전략의 변화를 야기함으로써 하지 손상위험이 증가되는 것으로 보고된다(Leppanen et al., 2017; Mason-Mackay, Whatman & Reid, 2016).

착지 시 하지 손상은 대부분 자세가 무너지며 발생되는 것으로 올바른 착지 전략을 구사하기 위해서는 하지 근육의 신장성 수축을 위한 근력과 근동원이 요구된다(Haff & Triplett, 2015). 본 연구에서는 외발 착지 시 초기 착지 시점과 15% 시점에 엉덩관절의 신전 모멘트가 양발 착지에 비해 크게 나타났고 이후에 발목관절에서 8~46% 동안 저측굴곡 모멘트가 관찰되었다. 이는 지면반력이 유의하게 차이나는 구간에서 착지자세를 유지하기 위한 전략으로 발목관절의 저측굴곡근과 엉덩관절의 신전근이 동원된 것으로 판단된다. 외발 착지자세에서 발목관절의 증가된 저측굴곡근의 신장성 수축은 햄스트링근과 더불어 경골의 전방전위를 억제하며(Mokhtarzadeh et al., 2013) 전방십자인대에 가해지는 부하를 감소시키는 것으로 보고된다(Morgan, Donnelly & Reinbolt, 2014).

충격흡수는 외발 착지 8~9% 구간에서 양발 착지에 비해 발목관절의 부적 관절 일률이 크게 관찰된다. 이는 외발 착지 시 충격흡수를 위해 최대 지면반력 시점 전부터 발목관절에서 조절되는 것으로 사료된다. 본 연구의 결과와 같이 선행연구에 의하면 발목관절은 외발 착지 시 안전한 착지를 위해 중요한 관절로 보고되며(Cho, Koh, Lee & Kim, 2012; Mason-Mackay et al., 2016; Mokhtarzadeh et al., 2013) 부하율을 감소시키고 충격을 상쇄시킨 역학을 하는 것으로 나타났다(Lee, Song & Shin, 2018; Rowley & Richards, 2015; Yeow et al., 2011).

외발 착지와 양발 착지 간에 무릎과 엉덩관절에서 관절 일률의 통계적으로 유의미한 차이는 나타나지 않았지만 외발 착지 시 초기 착지구간에서 무릎관절 및 엉덩관절 각속도가 양발 착지에 비해 느리게 관찰되었다. Yu, Lin & Garrett (2006)은 무릎관절과 엉덩관절의 각속도 감소는 착지 시 지면반력을 증가시킨다고 보고하였다. 따라서 외발 착지 시 충격흡수를 위한 두 관절의 기여도는 낮고 발목관절에 의존하는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구의 제한점은 시상면의 착지 전략만 분석되었기 때문에 관상면에서의 착지 전략은 확인할 수 없었고, 착지 시 주동근의 근활성을 확인할 수 없었다. 마지막으로 적은 대상자 수에 있다. 추후연구에서는 통계적 검증을 위한 충분한 사례 수 확보와 함께 관상면에서의 착지 전략뿐만 아니라 착지 시 동원되는 근의 발현 시점, 근활성 지속시간, 면적 등의 시계열적 분석이 실시된다면 안전한 착지 전략 강화를 위한 추가근거를 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

CONCLUSION

외발 착지 시 초기착지부터 최대 수직 지면반력에 도달하기까지 충격흡수를 위한 발목관절의 기여를 통해 저측굴곡근의 신장성 근력의 증가는 외력으로 인한 하지 근골격계 손상을 예방하기 위한 시상면에서의 착지 전략의 중요한 요인이 될 수 있을 것으로 사료된다.

REFERENCES

Arendt, E. A., Agel, J. & Dick, R. (1999). Anterior cruciate ligament injury patterns among collegiate men and women. *Journal of Athletic Training*, *34*(2), 86-92.

Boden, B. P., Torg, J. S., Knowles, S. B. & Hewett, T. E. (2009). Video analysis of anterior cruciate ligament injury: abnormalities in hip and ankle kinematics. *The American Journal of Sports Medicine*, *37*(2), 252-259.

Cho, J. H., Koh, Y. C., Lee, D. Y. & Kim, K. H. (2012). The Study of Strategy for Energy Dissipation Dur ing Drop Landing from Different Heights. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, *22*(3), 315-324.

Dai, B., Herman, D., Liu, H., Garrett, W. E. & Yu, B. (2012). Prevention of ACL injury, part I: injury characteristics, risk factors, and loading mechanism. *Research in Sports Medicine*, *20*(3-4), 180-197.

Dingenen, B., Malfait, B., Vanrenterghem, J., Robinson, M. A., Verschueren, S. M. & Staes, F. F. (2015). Can two-dimensional measured peak sagittal plane excursions during drop vertical jumps help identify three-dimensional measured joint moments?. *The Knee*, *22*(2), 73-79.

Engebretsen, L., Steffen, K., Alonso, J. M., Aubry, M., Dvorak, J., Junge, A., . . . Wilkinson, M. (2010). Sports injuries and illnesses during the Winter Olympic Games 2010. *British Jouranl of Sports Medicine*, *44*(11), 772-780.

Ford, K. R., Myer, G. D. & Hewett, T. E. (2007). Reliability of landing 3D motion analysis: implications for longitudinal analyses. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *39*(11), 2021-2028.

Frobell, R. B., Roos, H. P., Roos, E. M., Hellio Le Graverand, M. P., Buck, R., Tamez-Pena, J., . . . Lohmander, L. S. (2008). The acutely ACL injured knee assessed by MRI: are large volume traumatic bone marrow lesions a sign of severe compression injury? *Osteoarthritis Cartilage*, *16*(7), 829-836.

Grassi, A., Smiley, S. P., Roberti di Sarsina, T., Signorelli, C., Marcheggiani Muccioli, G. M., Bondi, A., . . . Zaffagnini, S. (2017). Mechanisms and situations of anterior cruciate ligament injuries in professional male soccer players: a YouTube-based video analysis. *European Journal of Orthopaedic Surgery & Traumatology*, *27*(7), 967-981.

Ha, S. & Park, S.-K. (2018). The effect of box height during drop landing on risk factors of anterior cruciate ligament injury in female players. *The Asian Journal of Kinesiology*, *20*(3), 24-31.

Haff, G. G. & Triplett, N. T. (Eds.). (2015). *Essentials of strength training and conditioning 4th edition*. Human kinetics. 440.

Heebner, N. R., Rafferty, D. M., Wohleber, M. F., Simonson, A. J., Lovalekar, M., Reinert, A., & Sell, T. C. (2017). Landing kinematics and kinetics at the knee during different landing tasks. *Journal of Athletic Training*, *52*(12), 1101-1108.

Hewett, T. E., Myer, G. D., Ford, K. R., Heidt, R. S., Jr., Colosimo, A. J., McLean, S. G., . . . 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.

Ireland, M. L. (1999). Anterior cruciate ligament injury in female athletes: epidemiology. *Journal of Athletic Training*, *34*(2), 150-154.

Koo, D., Maeng, H. & Yang, J. (2019). Vertical stiffness and lower limb kinematic characteristics of children with down syndrome during drop landing. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, *29*(3), 137-143.

Lategan, L., Crafford, K., Suliman, F. & Govender, N. (2014). Electrical muscle stimulation (EMS) training of the hamstrings. *African Journal for Physical Health Education, Recreation and Dance*, *20*(Issue-21), 439-452.

Lee, J., Song, Y. & Shin, C. S. (2018). Effect of the sagittal ankle angle at initial contact on energy dissipation in the lower extremity joints during a single-leg landing. *Gait & Posture*, *62*, 99-104.

Leppanen, M., Pasanen, K., Kujala, U. M., Vasankari, T., Kannus, P., Ayramo, S., . . . Parkkari, J. (2017). Stiff landings are associated with increased ACL injury risk in young female basketball and floorball players. *The American Journal of Sports Medicine*, *45*(2), 386-393.

Mason-Mackay, A. R., Whatman, C. & Reid, D. (2016). The effect of ankle bracing on lower extremity biomechanics during landing: A systematic review. *Journal of Science and Medicine in Sport*, *19*(7), 531-540.

Meyer, E. G. & Haut, R. C. (2005). Excessive compression of the human tibio-femoral joint causes ACL rupture. *Journal of Biomechics*, *38*(11), 2311-2316.

Mokhtarzadeh, H., Yeow, C. H., Hong Goh, J. C., Oetomo, D., Malekipour, F. & Lee, P. V. (2013). Contributions of the soleus and gastrocnemius muscles to the anterior cruciate ligament loading during single-leg landing. *Journal of Biomechanics*, *46*(11), 1913-1920.

Morgan, K. D., Donnelly, C. J. & Reinbolt, J. A. (2014). Elevated gastrocnemius forces compensate for decreased hamstrings forces during the weight-acceptance phase of single-leg jump landing: implications for anterior cruciate ligament injury risk. *Journal of Biomechics*, *47*(13), 3295-3302.

Myer, G. D., Ford, K. R., Brent, J. L. & Hewett, T. E. (2006). The effects of plyometric vs. dynamic stabilization and balance training on power, balance, and landing force in female athletes. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *20*(2), 345-353.

Myer, G. D., Ford, K. R., Khoury, J., Succop, P. & Hewett, T. E. (2011). Biomechanics laboratory-based prediction algorithm to identify female athletes with high knee loads that increase risk of ACL injury. *British Journal of Sports Medicine*, *45*(4), 245-252.

Olsen, O. E., Myklebust, G., Engebretsen, L. & Bahr, R. (2004). Injury mechanisms for anterior cruciate ligament injuries in team handball: a systematic video analysis. *The American Journal of Sports Medicine*, *32*(4), 1002-1012.

Padua, D. A., DiStefano, L. J., Beutler, A. I., de la Motte, S. J., DiStefano, M. J. & Marshall, S. W. (2015). The landing error scoring system as a screening tool for an anterior cruciate ligament injury-prevention program in elite-youth soccer athletes. *Journal of Athletic Training*, *50*(6), 589-595.

Pataky, T. C., Robinson, M. A. & Vanrenterghem, J. (2016). Region-of-interest analyses of one-dimensional biomechanical trajectories: bridging 0D and 1D theory, augmenting

statistical power. *PeerJ*, *4*, e2652.

Pfile, K. R., Hart, J. M., Herman, D. C., Hertel, J., Kerrigan, D. C. & Ingersoll, C. D. (2013). Different exercise training interventions and drop-landing biomechanics in high school female athletes. *Journal of Athletic Training*, *48*(4), 450-462.

Rowley, K. M. & Richards, J. G. (2015). Increasing plantarflexion angle during landing reduces vertical ground reaction forces, loading rates and the hip's contribution to support moment within participants. *Journal of Sports Sciences*, *33*(18), 1922-1931.

Ryu, J. S. (2014). Variability of GRF components between increased running times during prolonged run. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, *24*(4), 359-365.

Sell, T. C., Ferris, C. M., Abt, J. P., Tsai, Y., Myers, J. B., Fu, F. H. & Lephart, S. M. (2007). Predictors of proximal tibia anterior shear force during a vertical stop-jump. *Journal of Orthopedic Research*, *25*(12), 1589-1597.

Shimokochi, Y., Ambegaonkar, J. P., Meyer, E. G., Lee, S. Y. & Shultz, S. J. (2013). Changing sagittal plane body position during single-leg landings influences the risk of non-contact anterior cruciate ligament injury. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, *21*(4), 888-897.

Soligard, T., Steffen, K., Palmer, D., Alonso, J. M., Bahr, R., Lopes, A. D., . . . Engebretsen, L. (2017). Sports injury and illness incidence in the Rio de Janeiro 2016 Olympic Summer Games: A prospective study of 11274 athletes from 207 countries. *British Journal of Sports Medicine*, *51*(17), 1265-1271.

Steffen, K., Moseid, C. H., Engebretsen, L., Soberg, P. K., Amundsen, O., Holm, K., . . . Soligard, T. (2017). Sports injuries and illnesses in the Lillehammer 2016 Youth Olympic Winter Games. *British Journal of Sports Medicine*, *51*(1), 29-35.

Yeow, C. H., Lee, P. V. & Goh, J. C. (2011). An investigation of lower extremity energy dissipation strategies during single-leg and double-leg landing based on sagittal and frontal plane biomechanics. *Human Movement Science*, *30*(3), 624-635.

Yu, B. & Garrett, W. E. (2007). Mechanisms of non-contact ACL injuries. *British Journal of Sports Medicine*, *41 Suppl 1*, i47-51

Yu, B., Lin, C. F. & Garrett, W. E. (2006). Lower extremity biomechanics during the landing of a stop-jump task. *Clinical Biomechanics*, *21*(3), 297-305.