

Biomechanical Analysis of Walking and Running after a Surgically Repaired Achilles Tendon Rupture

아킬레스건 파열 수술 후 걷기 및 달리기 운동역학적 분석

Jeong Heo^{1,2}, Sang-Kyoon Park^{2,3}

¹FILA Footwear Biomechanics Lab. FILA Holdings, Busan, South Korea

²Motion Innovation Centre, Korea National Sport University, Seoul, South Korea

³Department of Physical Education, College of Sport Science, Korea National Sport University, Seoul, South Korea

Received : 02 September 2021

Revised : 09 November 2021

Accepted : 15 November 2021

Objective: The purpose of this study was to investigate the difference in muscle strength, kinematics, and kinetics between injured and non-injured sides of the leg after Achilles Tendon Rupture surgery during walking and running.

Method: The subjects (n=11; age = 30.63 ± 5.69 yrs; height = 172.00 ± 4.47 cm; mass = 77.00 ± 11.34 kg; time lapse from surgery = 29.81 ± 10.27 months) who experienced Achilles Tendon Rupture (ATR) surgery participated in this study. The walking and running trials were collected using infrared cameras (Oqus 300, Qualisys, Sweden, 100 Hz) on instrumented treadmill (Bertec, U.S.A., 1,000 Hz) and analyzed by using QTM (Qualisys Track Manager Ver. 2.15; Qualisys, U.S.A.). The measured data were processed using Visual 3D (C-motion Inc., U.S.A.). The cutoff frequencies were set as 6 Hz and 12 Hz for walking and running kinematics respectively, while 100 Hz was used for force plate data.

Results: In ATR group, muscle strength there were no difference between affected and unaffected sides ($p > .05$). In kinematic analysis, subjects showed greater ROM of knee joint flexion-extension in affected side compared to that of unaffected side during walking while smaller ROM of ankle dorsi-plantar and peak knee flexion were observed during running ($p < .05$). In kinetic analysis, subjects showed lower knee extension moment (running at 2.2 m/s) and positive ankle plantar-flexion power (running at 2.2 m/s, 3.3 m/s) in affected side compared to that of unaffected side ($p < .05$). This lower positive ankle joint power during a propulsive phase of running is related to slower ankle joint velocity in affected side of the subjects ($p < .05$).

Conclusion: This study aimed to investigate the functional evaluation of the individuals after Achilles tendon rupture surgery through biomechanical analysis during walking and running trials. Based on the findings, greater reduction in dynamic joint function (i.e. lower positive ankle joint power) was found in the affected side of the leg compared to the unaffected side during running while there were no meaningful differences in ankle muscle strength and walking biomechanics. Therefore, before returning to daily life and sports activities, biomechanical analysis using more dynamic movements such as running and jumping trials followed by current clinical evaluations would be helpful in preventing Achilles tendon re-rupture or secondary injury.

Keywords: Achilles tendon rupture, Walking, Running, Biomechanical analysis

Corresponding Author

Sang-Kyoon Park

Department of Physical Education,
College of Sport Science, Korea
National Sport University, Seoul,
05541, South Korea

Email : spark@knsu.ac.kr

INTRODUCTION

오늘날 건강에 대한 관심이 증가하면서 운동에 참여하는 인구는 2018년 대비 약 4% 증가했으며, 총 운동 참여 인구의 약 66%가 유산소 운동에 참여하고 있다. 운동 참여 인구가 증가함에 따라 운동으로 인한 상해 비율도 증가하고 있으며, 이때 달리기 동작 및 운동상해에서 무릎관절과 발목관절에서 가장 많은 상해가 발생한다고 보고되어진다(Francis, Whatman, Sheerin, Hume & Johnson, 2019).

발목관절 관련 상해 중 하나인 아킬레스건 파열(Achilles Tendon Rupture)은 운동 참여의 증가와 활동성 증가로 인해 지속적으로 발생하고 있다. 또한, 지난 30년 동안 지속적으로 증가하였으며, 10만 명당 22명의 비율로 아킬레스건 파열이 발생했다고 보고된다(Houshian, Tscherning & Riegels-Nielsen, 1998). 아킬레스건 파열은 남성이 여성에 비해 5배 높은 확률로 남성에서 많이 발생하며, 30~55세의 연령에서 가장 많은 아킬레스건 파열이 발생한다고 보고되어진다(Lantto, Heikkinen, Flinkkilä, Ohtonen & Leppilahti, 2015).

우리 인체 내에서 가장 강한 힘줄이라고 알려져 있는 아킬레스건은 약 15 cm로 콜라겐(collagen), 엘라스틴(elastin)으로 구성되어 있다(O'Brien, 2005). 아킬레스건을 구성하고 있는 콜라겐과 엘라스틴으로 인해 이등운동 및 점프 동작 시 신장-수축 사이클(Stretch-Shortening Cycle [SSC])이 나타남에 따라 아킬레스건에서 생성되는 탄성에너지의 이점으로 인해 운동 동작 중 에너지보존 메커니즘을 수행하는 것으로 알려져 있다(Alexander, 1984; Biewener, 1998). 아킬레스건은 장딴지근(gastrocnemius)과 가자미근(soleus)에서 시작되어 발꿈치거친면에 부착되어 있으며, 발바닥 쪽 굽힘(plantar flexion) 동작에서 발생하는 힘을 전달하는 역할을 한다(Dawe & Davis, 2011).

일반적으로 아킬레스건은 이등운동 및 운동 동작 시 크고 작은 부하를 받게 되는데, 걷기 시에는 체중의 3배 그리고 달리기 시에는 체중의 12배에 달하는 부하가 발생된다고 보고되어진다(Byers III & Berquist, 1996; Giddings, Beaupre, Whalen & Carter, 2000; Komi, 1990; Lee, Ryu, Gil & Park 2021). 한편, 아킬레스건 파열의 원인은 외재적 요인과 내재적 요인으로 구분되며, 외재적 요인의 경우 동작의 난이도, 강도 및 환경적 요인으로 인해 아킬레스건이 파열되는 것을 의미하고(Schepisis, Jones & Haas, 2002; White, Wenke, Mosely, Mountcastle & Basamania, 2007), 내재적 요인은 과사용(overuse)으로 인한 미세 손상, 근육의 약화, 불균형, 힘줄의 노화 및 높은 신장성수축(eccentric contraction) 동작에서 비정상적인 힘의 작용으로 인해 아킬레스건의 파열에 부정적인 영향을 끼칠 수 있다고 보고되어진다(So & Pollard, 1997; White et al., 2007). 마찬가지로 스포츠 동작에서 지속적인 충격과 부하는 미세 손상의 원인이 될 수 있으며, 갑작스러운 큰 부하 또는 방향전환 시 발생하는 부하는 아킬레스건 파열을 일으키는 원인이 될 수 있다고 보고되어진다(Aubry et al., 2013).

아킬레스건 파열의 주된 위치는 혈류의 흐름이 가장 적은 발꿈치 부착점으로부터 신체의 근위 방향으로 2~6 cm 부분에서 80% 이상 발생한다고 보고되어진다(Starkey & Ryan, 2002). 아킬레스건 파열의 치료는 보존적 치료와 수술적 치료로 구분되어지는데 두 가지의 치료 목적은 파열된 건을 기존 위치에 부착하여 손상 이전의 기능으로 돌아 갈 수 있게 하는 목적이 있으며, 수술적 치료는 보존적 치료에 비해 회복에 걸리는 시간이 짧기 때문에 운동선수와 활동성이 많은 젊은 남성의 경우, 높은 비율로 수술적 치료 방법을 선택한다고 보고되어진다(Rebecato, Santini, Salmaso & Nogarin, 2001; Erickson et al., 2015; Park, Lee, Kang & Lee, 2018).

보편적으로 아킬레스건 파열 수술 후 RTP (return to play)로 복귀 기간은 평균 6개월 정도 기간이 소요된다고 보고되어지고 있으며, 초음파 검사, 주관적 설문(ATRS: Achilles Tendon Rupture Score, FAOS: Foot and Ankle Outcome Score) 등 기능적 회복 척도 또는 기능적 평가를 통해 복귀가 이루어진다(Zellers, Carmont & Silbernagel, 2016). 초음파 검사는 파열된 아킬레스건이 수술적 치료를 통해 손상 전 모습으로 구조적인 문제가 없는지를 확인하며, 주관적 설문(ATRS) 아킬레스건 파열 환자를 대상으로 실시하여 통증, 운동범위, 일상생활 및 스포츠 활동의 평가를 위해 제작되었다. FAOS 설문과 유사하지만, 10개의 문항으로 인해 빠른 응답을 받을 수 있다는 장점이 있고, 아킬레스건 파열 환자만을 대상으로 아킬레스건 파열 수술 후 기능적 평가에 대한 신뢰성 및 유효성이 높은 설문으로 기능적 평가에 높은 사용률이 보고되어진다(Nilsson-Helander et al., 2007). 하지만, 초음파 검사

에서 파열된 아킬레스건이 구조적으로 완치가 되었음에도, 손상측 및 비손상측에서 근력의 차이가 나타났다. 또한, 주관적 설문에서 높은 점수를 받은 대상자임에도 불구하고 손상측에서 발꿈치 들기 횟수, 발꿈치 들기 최고 높이 등에서 기능적 저하가 나타났다고 보고되어진다(Brorsson et al., 2016). 이 때, 주된 기능 저하는 장딴지근과 가자미근의 근력약화로 인해 발바닥 쪽 굽힘 모멘트의 감소, 아킬레스건의 신장(elongation)으로 인해 발등 쪽 굽힘 각도의 증가와 발등 쪽 굽힘 각속도가 저하되는 것이 대표적인 기능적 저하로 보고되어진다(Marcolin, Buriani, Balasso, Villammar & Petrone, 2015). 뿐만 아니라 손상측과 비손상측 사이에서 비대칭이 나타나며, 편측에 지속적인 부하로 인해 2차 상해 위험성을 높인다고 보고되었다. 특히, 아킬레스건 파열로 인해 나타난 기능적 저하는 발목관절에 직접적인 영향을 주고, 발목관절의 근위관절인 무릎관절에서 더 높은 상해율이 나타났다고 보고되어진다(Sadeghi, Allard, Prince & Labelle, 2000; Don et al., 2007; Ciacci, Michele, Fantozzi & Merni, 2013).

실제 아킬레스건 파열의 수술적 치료 후 일상생활로 복귀한 환자를 대상으로 주관적 설문(ATRS)의 높은 점수를 기록했음에도 불구하고, 발목관절에서 근력의 손실과 그에 따른 움직임의 제한을 운동역학적 분석을 포함하여 살펴본 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구의 목적은 아킬레스건 파열로 인한 수술적 치료를 받은 후 일상생활로 복귀한 인원을 대상으로 ATRS 설문, 발목관절의 최대 근력 차이와 실생활에 가장 많이 활용되는 걷기 및 달리기 시 운동역학적 분석을 통해 아킬레스건 파열 수술 후 나타날 수 있는 특징을 보다 종합적으로 기능적 분석 및 양측 하지관절의 차이 정도를 알아보고자 하였다. 이를 통해서 아킬레스건 파열의 수술적 치료 후 환자들이 일상과 운동상황에 복귀하기 위한 주관적 설문 및 기능적 평가와 더불어 운동역학적 분석을 통하여 일상생활 및 운동 참여에 있어 회복의 상태를 파악하는 것에 목적이 있다.

METHOD

1. 연구 대상자

본 연구의 참여 대상자는 총 11명으로 구성하였으며, ATR 집단(Achilles Tendon Rupture)은 아킬레스건 파열로 정형외과적 수술 후 1년 이상 경과되고 5년 이내의 20~40대(age: 30.63±5.69 yrs, height: 172±4.47 cm, mass: 77±11.34 kg, 29.81±10.27 months after surgery)를 대상으로 ATRS 설문을 실시 및 모집하였다. 대상자 모두 ATRS (Achilles Tendon Rupture Score) 설문 점수는 70점 이상이며, 현재 스포츠 활동에 참여하고 있으며, 모든 대상자는 자발적으로 참여하였으며, 동의서에 서명 후 연구에 참여하였다. 본 연구는 K대학의 연구윤리 위원회(IRB)에서 승인(IRB 승인 번호: 20200518-033)후 실험을 실시하였다.

2. 연구 방법

1) 하지 근력 측정

대상자 발목관절의 최대 근력을 측정하기 위해, 등속성근기능 검사장비(Humac Norm, CSMI, USA)를 사용하였다. 하지 근력 측정은 손상



Figure 1. Testing methods (left: muscle strength, right: motion analysis)

측, 비손상측의 발목관절을 대상으로 발바닥 쪽 굽힘 최대 근력을 측정하였으며, 각속도 $30^{\circ}/\text{sec}$, $60^{\circ}/\text{sec}$ 로 설정하였다. 두 가지의 각속도에 대하여 검사 전 3회 연습 실시하였고, 측정은 4회 반복하였다. 이때, 정확한 측정을 위하여 대상자를 기구에 편한 자세로 엎드리도록 하였으며, 무릎관절의 굽힘이 나타나지 않도록 고정하였다(Figure 1) (Porter et al., 2014).

2) 동작 분석

걷기 및 달리기의 동작분석 실험 과정에서 안전을 위해 준비운동을 5분간 실시하였다. 제공된 복장과 자신의 신발을 신고, 양하지의 관절과 분절을 나타내기 위해 반사 마커 23개와 허벅지, 종아리에 4개의 마커로 구성된 클러스터를 부착하였다. 촬영 장비는 적외선 카메라(Oqus 300, Qualisys, Sweden)를 사용하였으며, 샘플링 율(sampling rate)은 100 Hz로 설정하였다. 지면반력기가 내재되어 있는 트레드밀(Instrumented treadmill, Bertec, USA)을 사용하여 보행과 달리기를 수행하였으며, 지면반력의 샘플링 율(sampling rate)은 1,000 Hz로 설정하였다. 분석 구간은 연구 대상자의 발꿈치가 지면에 닿는 순간(heel strike)부터 지면으로부터 발이 떨어지는 시점(toe off)까지의 지지국면(stance phase)으로 구분하여 운동역학적 분석 구간으로 설정하였다. 걷기 속도 1.4 m/s와 달리기 2가지 속도인 2.4 m/s, 3.3 m/s로 순서를 무작위로 선정하여 진행하였다(Figure 1) (Ryu, 2019; Kim et al., 2019).

3. 자료 처리

발목관절의 최대 근력(peak torque)은 체중으로 표준화(Nm/kg)하였으며, 운동역학적 분석으로 걷기와 달리기의 원자료(raw data)는 Qualisys Track Manager (Qualisys, Sweden) 프로그램을 통하여 각 관절, 분절의 위치 데이터와 지면반력 자료를 취득하였다. 취득한 자료의 노이즈를 제거하기 위해 위치 데이터와 지면반력 데이터는 Butterworth 2nd order low-pass filter를 사용하였다. 이때, 마커 데이터는 각각 보행과 달리기의 경우 6 Hz과, 12 Hz (Heiderscheit, Chumanov, Michalski, Wille & Ryan, 2011)로 지면반력 자료는 100 Hz로 차단주파수를 설정하였다. 필터링된 데이터를 사용하여 하지관절 모멘트는 지면반력 데

이터를 통한 역동역학(verse dynamics) 방법을 사용한 Visual3D v.3 (C-Motion, USA) 프로그램을 사용하여 실시하였으며, 관절 파워(Joint Power)는 산출된 관절 모멘트와 각속도를 스칼라 곱하여 산출하였다. 시상면의 발목, 무릎 및 엉덩관절의 양의 값(+)은 굽힘과 발등 쪽 굽힘을 의미하고 음의 값(-)은 폼과 발바닥 쪽 굽힘을 의미한다.

4. 통계 처리

통계 처리의 경우 SPSS 21.0 (IBM, USA) 프로그램을 통하여 ATR 집단 내(손상측: I vs. 비손상측: UI) 발목관절의 근력과 걷기 및 달리기 동작에서 나타나는 차이를 검증하기 위해 대응(paired)표본 *t*-test 실시하였다. 이 때 유의 수준은 $\alpha = .05$ 로 설정하였다.

RESULTS

본 연구는 아킬레스건 파열경험이 있는 집단을 대상으로 발목관절의 근력, 실생활 및 스포츠 동작에 가장 많이 기본이 되는 걷기, 달리기 동작을 선정하여 아킬레스건 파열 집단 내에서 손상측(I)과 비손상측(UI)의 근력과 하지관절의 운동학, 운동역학적 변인의 특징을 건강한 집단과 비교하여 분석하였다.

1. 등속성근기능 검사

ATR 집단 내 손상측, 비손상측 발바닥 쪽 굽힘 최대 근력 등속성근기능 검사의 결과는 다음과 (Table 1) 같다. ATR 집단 내 발목관절의 근력의 차이는 손상측(I)이 비손상측(UI)에 비해 상대적으로 작았으나,

Table 1. Ankle muscle strength of ATR group

(Nm/kg)		$30^{\circ}/\text{s}$	<i>t</i> (<i>p</i>)	$60^{\circ}/\text{s}$	<i>t</i> (<i>p</i>)
Peak	I	103.72±14.73	-.829 (.426)	77.81±20.05	-1.302 (.222)
Torque	UI	107.90±21.75		83.90±19.06	

I: Involved UI: Uninvolved
* $p < .05$

Table 2. ATR group walking (1.4 m/s) kinematic parameter (Range of joint angles, Peak joint angles)

(°)	1.4 m/s walking		<i>t</i> (<i>p</i>)
Ankle sagittal plane ROM	I	27.5±3.70	-.202 (.844)
	UI	27.8±4.81	
Knee sagittal plane ROM	I	47.3±3.49	4.608 (.001)*
	UI	44.7±3.54	
Hip sagittal plane ROM	I	35.1±3.43	.3331 (.748)
	UI	34.9±2.88	
Peak joint angles			
Peak dorsi flexion	I	11.64±2.52	-.562 (.587)
	UI	12.18±3.46	
Peak plantar flexion	I	15.90±4.42	-.246 (.811)
	UI	15.59±6.13	
Peak knee extension	I	6.26±3.42	-2.201 (.052)
	UI	4.13±2.12	
Peak knee flexion	I	40.98±2.79	.520 (.614)
	UI	40.59±3.56	
Peak hip extension	I	10.32±7.18	.490 (.635)
	UI	10.02±7.33	
Peak hip flexion	I	24.85±5.89	-.092 (.929)
	UI	24.91±7.08	

I: Involved UI: Uninvolved
**p*< .05

통계적으로 유의한 차이는 나타나지 않았다(*p*> .05).

2. ATR 집단 내 아킬레스건 손상에 따른 걷기(1.4 m/s) 운동학적 변인 및 운동역학적 변인

걷기 동작에서 ATR 집단 내 손상측(I)과 비손상측(UI) 운동학적 변인의 비교 결과로 발목관절, 무릎관절, 엉덩관절에서 나타난 관절 별 가동범위의 결과는 (Table 2)와 같다. 걷기 동작에서 무릎관절 가동범위(ROM)를 제외한 이외의 관절에서 운동학 및 운동역학적 변인에는 차이가 나타나지 않았다(*p*> .05). 무릎관절 가동범위는 손상측이 비손상측에 비해 더 큰 무릎관절 가동범위를 나타냈으며, 통계적으로 유의한 차이가 나타났다(*p*< .05).

3. ATR 집단 내 아킬레스건 손상에 따른 달리기(2.4 m/s, 3.3 m/s) 운동학적 변인

2.4 m/s 달리기 동작에서 운동학적 변인은 손상(I)측이 비손상측(UI)에 비해 발목관절 가동범위는 더 작게 나타났으며(*p*< .05), 발목관절 발바닥 쪽 굽힘 최대 각속도는 달리기 동작의 두 가지 속도(2.4, 3.3 m/s) 모두에서 손상측이 비손상측에 비해 더 작게 나타나 통계적으로 유의한 차이가 나타났고(*p*< .05) 또한 무릎관절의 최대 굽힘 각도는 손상측이 비손상측에 비해 작게 나타났다(*p*< .05) (Table 3).

4. ATR 집단 내 아킬레스건 손상에 따른 달리기(2.4 m/s, 3.3 m/s) 운동역학적 변인

ATR 집단 내에서 손상측과 비손상측 간에 달리기 시 나타나는 하지

Table 3. ATR group running (2.4 m/s, 3.3 m/s) kinematic parameter (Range of joint angles, Peak joint angles, Peak joint angular velocities)

(°)	2.4 m/s running		<i>t</i> (<i>p</i>)	3.3 m/s running		<i>t</i> (<i>p</i>)
Range of joint angles						
Ankle sagittal plane ROM	I	37.6±4.08	-3.042 (.012)*	37.6±5.38	-2.144 (.058)	
	UI	39.7±4.57		39.8±4.50		
Knee sagittal plane ROM	I	28.2±3.95	.074 (.943)	27.0±4.77	.336 (.744)	
	UI	28.1±4.63		26.7±6.26		
Hip sagittal plane ROM	I	30.6±3.05	-.473 (.647)	37.3±3.69	-.055 (.958)	
	UI	31.0±9.61		37.4±3.15		
Peak joint angles						
Peak dorsi flexion	I	18.2±3.29	-.674 (.515)	18.2±3.98	-1.012 (.335)	
	UI	18.7±2.96		18.9±4.30		
Peak plantar flexion	I	19.4±3.95	1.722 (.116)	19.4±3.91	1.293 (.225)	
	UI	21.0±4.06		20.9±2.84		
Peak knee extension	I	3.4±5.15	-.642 (.535)	4.0±4.23	-1.652 (.130)	
	UI	4.3±3.72		5.9±3.90		

Table 3. ATR group running (2.4 m/s, 3.3 m/s) kinematic parameter (Range of joint angles, Peak joint angles, Peak joint angular velocities) (Continued)

($^{\circ}$)		2.4 m/s running		$t(p)$	3.3 m/s running		$t(p)$
Peak knee flexion	I	31.6±3.55		-.810 (.437)	31.0±5.15		2.238 (.049)*
	UI	32.4±3.95			32.6±4.56		
Peak hip extension	I	2.8±5.83		-.034 (.973)	6.5±7.41		-.463 (.654)
	UI	2.7±6.18			6.2±7.56		
Peak hip flexion	I	27.8±6.95		-.638 (.538)	30.8±7.00		-.561 (.587)
	UI	28.3±8.16			31.2±7.67		
($^{\circ}/s$)		Angular velocity					
Ankle plantar flexion	I	315.65±33.24		3.633 (.005)*	436.02±55.33		2.659 (.024)*
	UI	343.52±39.23			468.56±46.30		

I: Involved UI: Uninvolved

* $p < .05$ **Table 4.** Peak joint moments of ATR group during running (2.4 m/s, 3.3 m/s)

(Nm/kg)		2.4 m/s running		$t(p)$	3.3 m/s running		$t(p)$	
Ankle	Plantar flexion	I	2.33±0.27		-.223 (.828)	2.70±0.42		-.485 (.638)
		UI	2.35±0.18			2.74±0.26		
Knee	Extension	I	1.34±0.25		-1.127 (.286)	1.47±0.38		-2.461 (.034)*
		UI	1.42±0.30			1.61±0.45		
	Flexion	I	0.51±0.17		1.565 (.149)	0.69±0.25		.560 (.588)
		UI	0.55±0.17			0.71±0.29		
Hip	Extension	I	0.52±0.10		.336 (.774)	0.64±0.21		.502 (.626)
		UI	0.51±0.10			0.62±0.18		
	Flexion	I	1.77±0.34		.106 (.918)	2.34±0.48		1.001 (.341)
		UI	1.77±0.40			2.44±0.55		

I: Involved UI: Uninvolved

* $p < .05$ **Table 5.** Peak joint power of ATR group during running (2.4 m/s, 3.3 m/s)

(W/kg)		2.4 m/s running		$t(p)$	3.3 m/s running		$t(p)$
Positive ankle joint power	I	6.18±1.22		-3.948 (.003)*	9.02±2.15		2.962 (.014)*
	UI	6.70±1.20			9.99±1.85		
Positive knee joint power	I	3.15±0.88		-.963 (.358)	4.23±1.75		-1.646 (.131)
	UI	3.23±0.79			4.51±1.73		
Positive hip joint power	I	1.21±0.62		-.127 (.901)	2.55±1.25		-.836 (.423)
	UI	1.23±0.69			2.81±1.97		

I: Involved UI: Uninvolved

* $p < .05$

관절의 운동역학 변인인 관절 모멘트와 추진에 해당하는 양(+)관절 파워의 결과는 (Table 4, Table 5, Figure 2)과 같다. 두 가지 속도의 달리

기 동작에서 나타난 관절 별 모멘트는 3.3 m/s 달리기에서 무릎관절 펌 모멘트가 손상측이 비손상측에 비해 더 작게 나타났고 통계적으로

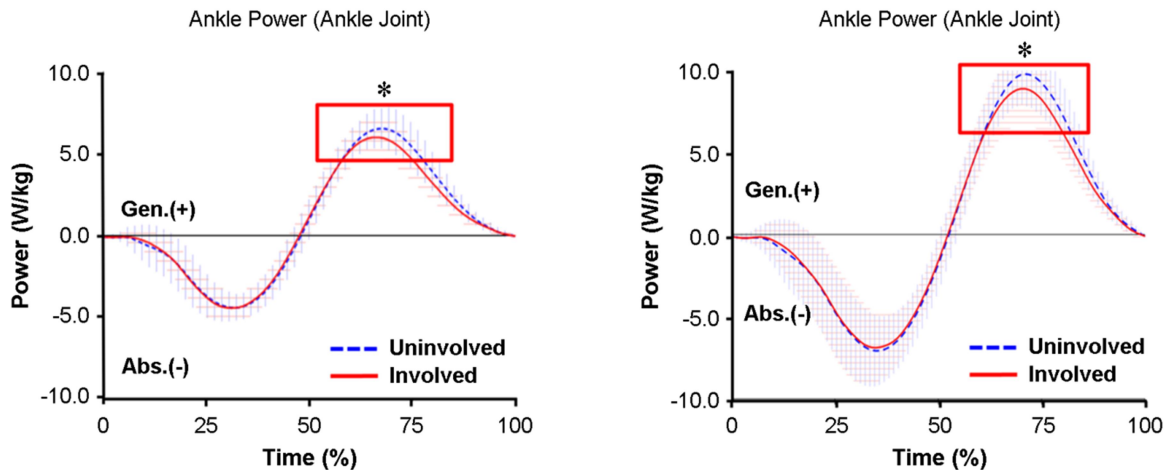


Figure 2. Ankle joint power (left: 2.4 m/s running, right 3.3 m/s running)

유의한 차이가 나타났다(Table 4, $p < .05$). 발목관절에서 양의 파워는 두 가지 속도 모두 손상측이 비손상측에 비해 더 작게 나타났으며, 이는 통계적으로 유의한 차이가 나타났다($p < .05$).

DISCUSSION

1. ATR 집단 내 발목관절 최대 근력 검사

최대 근력을 측정하기 위해 등속성근기능 검사 장비를 사용하여 각 속도 $30^\circ/s$, $60^\circ/s$ 에서 각 4회씩 실시하였다(Porter et al., 2014). 본 연구의 최대 근력 검사의 결과는 집단 내 분석에서 통계적으로 유의한 차이는 나타나지 않았다. Beskin, Sanders, Hunter & Hughston (1987)의 선행연구에서도 외과적 수술 후 근력 검사 결과의 차이는 나타나지 않았으며, 또한 ATR 집단의 피험자 모두 정상생활 및 보통 수준의 스포츠 활동에 참여하는데 큰 어려움이 없다고 하였다. 더불어 아킬레스건 파열 수술 후 1년 이상의 시간 경과와 지속적인 재활운동으로 인해 일정 수준 이상으로 근력 회복이 된 것으로 판단된다. 하지만 손상측의 하지 최대 근력의 회복만으로 동적인 상황의 발생하는 높은 수준의 하지관절 부하와 기능적 요구 수준을 예측하는데 한계가 존재할 것이다. 이에 보행이나 런닝과 같은 보다 동적인 동작에 대한 운동역학적인 분석을 통해서 아킬레스건 파열 후 회복의 정도를 보다 종합적 판단하는 데 중요한 자료를 제공할 수 있다고 판단되어진다.

2. ATR 집단 내 걷기 동작의 운동역학적 분석

ATR 집단 내 손상측(I)과 비손상측(UI)의 차이를 비교했을 때 걷기 동작분석의 결과는 무릎관절 가동범위를 제외한 이외의 운동학적 및 운동역학적 변인에서 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다. Neumann, Vogt, Banzer & Schreiber (1997), Don et al. (2007)의 연구에 의하면 아킬레스건 파열 수술 후 일반적으로 24개월 이상 회복 시간 경과에 따라 비교적 쉬운 걷기 동작을 수행하는데 있어서 손상측과 비손상측 간의 기능적 차이는 나타나지 않는다고 보고하였다. 이와 같은 선행연구의 결과와 본 연구의 무릎 각도 결과를 제외하곤 일치

함을 보였다. 신체를 이동시키는 가장 기본적인 걷기를 수행하는데 있어 시간의 경과와 일상생활에서 걷기 동작을 반복 수행하였기 때문에 손상측의 큰 부정적인 영향이 나타나지 않은 것으로 판단된다. 하지만, ATR 집단 내 손상측 무릎관절에서 더 큰 신전이 나타남으로 인해 비손상측에 비해 더 큰 가동범위가 나타났다. Moseley, Wales, Herbert, Schurr & Moore (1993), Cooper, Alghamdi, Alghamdi, Altowajri & Richardson (2012) 등 여러 연구에서 종아리세갈래근군의 기능적 움직임은 주로 발등 쪽 굽힘과 무릎의 굽힘이나, 폼을 막아주는 길항근의 역할을 수행한다. 길항근의 역할을 원활하게 수행하지 못함에 따라 무릎관절에서 과신전이 나타날 수 있다. 또한 지지기 동안 무릎관절의 과신전을 통해 신체를 보다 더 안정시키기 위하여 보상작용이 나타난다고 보고하였다. 즉, ATR 집단 내 손상측에서 종아리세갈래근군의 약화로 인해 무릎관절 폼이 커지는 보상작용이 지속적으로 나타난 것으로 판단된다.

3. ATR 집단 내 달리기(2.4 m/s, 3.3 m/s) 동작의 운동역학적 분석

ATR 집단 내에서 발목관절 각도(ROM), 발바닥 쪽 굽힘 각속도, 무릎관절의 폼 모멘트, 양(+)의 관절 파워에서 유의한 차이가 나타났으며 ($p < .05$), 이 외 운동학 및 운동역학적 변인은 차이가 나타나지 않았다. Willy et al. (2017), Jandacka, Zahradnik, Foldyna & Hamill (2013), Jandacka et al. (2017)의 연구에 따르면 달리기 동작 시 나타나는 발목관절의 차이는 손상측에서 주로 발등 쪽 굽힘 각이 증가하여 발바닥 쪽 굽힘 각도가 감소하기 때문에, 발바닥 쪽 굽힘의 모멘트도 감소한다고 보고하였다. 하지만 본 연구 결과는 ATR 집단 내에서 발등 쪽 굽힘의 증가와 발바닥 쪽 굽힘 모멘트의 감소는 나타나지 않았다. 이 같은 결과는 아킬레스건 파열 수술 후 회복 과정에서 발목관절의 굽힘 각도의 증가와 수술방법 및 회복 수준에 따라 아킬레스건의 신장된 길이 차이와 개인 신체적 특성으로 인해 위와 같은 일반적인 변화가 나타나지 않은 것으로 사료된다. Jandacka et al. (2017)는 발바닥 쪽 굽힘의 감소로 인해 손상측 발목관절 가동범위가 감소한다고 보고하였다. 본 연구의 결과에서 최대 발바닥 쪽 굽힘 각도는 손상측에서 비손

상측에 비해 감소된 연구 결과가 나타났으며, 아킬레스건 파열 손상으로 인해 발목관절 각도(ROM)의 차이를 나타낸 것으로 판단된다. 더불어 손상측 발목관절 발바닥 쪽 굽힘 움직임 제한으로 손상측이 비손상측에 비해 발바닥 쪽 굽힘 동작에서 더 느린 각속도가 나타났다 ($p < .05$). 이를 기반으로 발목관절의 양의 파워를 살펴보면, 손상측이 비손상측에 비해 보다 더 작은 결과가 나타났는데 이는 힘을 발생하는 부분에서는 차이가 없지만 동작의 제한과 움직임의 빠르기의 저하로 인해 발목관절의 추진 시 나타나는 양의 파워에 부정적인 영향을 끼친 것으로 판단된다. Jandacka et al. (2017)의 연구에 따르면, 아킬레스건 파열 수술 후 회복되는 과정에서 아킬레스건 구조적 특성 변화로 인해 이력현상(Hysteresis)이 나타남에 따라서 아킬레스건이 신장되며, 손상측 발목관절의 발바닥 쪽 굽힘 각속도 저하, 추진 시 발목관절의 양(+)의 파워에서 부정적인 영향을 주었다고 보고되어진다. 따라서 2.4 m/s 달리기 시 ATR 집단 내 아킬레스건 신장 길이의 변화는 확인하지 못하였지만, 선행연구와 일치하는 결과가 나타난 바, ATR 집단 내 손상측에서 아킬레스건 구조적 변화로 인해 발목관절의 기능적 움직임 저하가 나타났음을 추측할 수 있다. ATR 집단 내 손상측이 비손상측에 비해 더 큰 무릎관절 굽힘 각도와 더 큰 펌 모멘트가 나타났으며, 이는 보다 비손상측에 무릎관절에서 의존도가 높다고 판단된다. Årøen, Helgø, Granlund & Bahr (2004)의 연구 결과에 따르면 손상측에 비해 비손상측에 보다 더 높은 의존도로 인해 비손상측에서 과부하로 인한 2차 손상확률이 더 높다고 보고하였다.

아킬레스건 파열로 인해 손상측을 포함한 비손상측에도 영향을 주어 비수술 집단과의 차이가 발생할 수 있으나 (Willy et al., 2017)의 연구 결과에 의하면 정상인 집단과 기능적인 움직임에서는 큰 차이를 나타내지 않는다고 보고하였다. 아킬레스건 파열로 인한 영향을 일반화시키기 어려우나 회복의 관점에서 손상측과 비손상측을 비교함으로써 보다 개인의 상태를 보다 종합적으로 판단할 수 있을 것이다.

아킬레스건 파열로 인한 수술 후 1년 이상이 회복 시간이 경과됨에 따라 발목의 근력, 걷기 및 달리기를 수행하는데 있어 큰 무리가 없다고 판단되나, 아킬레스건 파열과 신장으로 인한 기계적 특성의 변화가 추측된다. 또한, 동작 강도가 증가함에 따라서 비손상측에서 무릎관절의 펌 모멘트의 우세로 보아 동작의 난이도가 높은 강한 점프, 스프린팅 등의 동작 수행 시 더 큰 발목관절에서 더 큰 기능 저하가 나타날 것으로 사료되며, 또한 비손상측에서 무릎관절에 부하는 비대칭적으로 더 커질 것이라고 예상된다. 따라서, 아킬레스건 상해 및 또 다른 2차적 손상이 더 높은 확률로 발생할 것으로 예상되며, 아킬레스건 파열로 인한 수술 후 일상생활 복귀 과정에서의 기능적 평가(예: 근력, 설문지)와 운동역학적 통합 척도(예: 관절 모멘트 및 파워)를 통하여 복귀시점, 회복상태를 알 수 있는 지표가 필요할 것으로 판단된다.

CONCLUSION

본 연구는 아킬레스건 파열 수술 후 걷기, 달리기 동작으로 운동역학분석을 하여 기능을 살펴보고자 하였다. 걷기 결과로는 손상측에서 더 큰 무릎관절 각도(ROM)이 나타났으며, 달리기 시 손상측에서 더 느린 발목관절 각속도와, 작은 발목관절 파워가 나타났다. 이를 토대로 보았을 때, 아킬레스건 파열 수술 후 1년 이상의 시간이 경과에도 불구하고 동적인 상황에서의 기능적 저하가 나타나고 있음으로 사료

된다. 따라서 일상생활 및 스포츠 활동으로 돌아가기 앞서 아킬레스건 파열 수술 후 6개월 또는 1년 후 임상적 평가와 더불어 실생활과, 운동상황에서 기초가 되는 걷기와 달리기 동작을 통한 운동역학적 분석을 병행하여 평가한다면, 아킬레스건 재 파열 또는 2차적 상해를 방지하는데 도움이 될 것으로 사료된다.

ACKNOWLEDGEMENT

This study is extracted from Jeong Heo's Master Thesis and Jeong Heo was financially supported by FILA Holdings for his thesis.

REFERENCES

- Alexander, R. M. (1984). Elastic energy stores in running vertebrates. *American Zoologist*, 24(1), 85-94.
- Årøen, A., Helgø, D., Granlund, O. G. & Bahr, R. (2004). Contralateral tendon rupture risk is increased in individuals with a previous Achilles tendon rupture. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 14(1), 30-33.
- Aubry, S., Risson, J. R., Kastler, A., Barbier-Brion, B., Siliman, G., Runge, M. & Kastler, B. (2013). Biomechanical properties of the calcaneal tendon *in vivo* assessed by Transient Shear Wave Elastography. *Skeletal Radiology*, 42(8), 1143-1150.
- Beskin, J. L., Sanders, R. A., Hunter, S. C. & Hughston, J. C. (1987). Surgical repair of Achilles tendon ruptures. *The American Journal of Sports Medicine*, 15(1), 1-8.
- Biewener, A. A. (1998). Muscle-tendon stresses and elastic energy storage during locomotion in the horse. *Comparative Biochemistry and Physiology PART B: Biochemistry and Molecular Biology*, 120(1), 73-87.
- Brorsson, A., Olsson, N., Nilsson-Helander, K., Karlsson, J., Eriksson, B. I. & Silbernagel, K. G. (2016). Recovery of calf muscle endurance 3 months after an Achilles tendon rupture. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 26(7), 844-853.
- Byers III, G. E. & Berquist, T. H. (1996). Radiology of sports-related injuries. *Current Problems in Diagnostic Radiology*, 25(1), 2-49.
- Ciacchi, S., Di Michele, R., Fantozzi, S. & Memi, F. (2013). Assessment of Kinematic Asymmetry for Reduction of Hamstring Injury Risk. *International Journal of Athletic Therapy and Training*, 18(6), 18-23.
- Dawe, E. J. & Davis, J. (2011). (vi) Anatomy and biomechanics of the foot and ankle. *Orthopaedics and Trauma*, 25(4), 279-286.
- Don, R., Ranavolo, A., Cacchio, A., Serrao, M., Costabile, F., Iachelli, M., Camerota, F., Frascarelli, M. & Santilli, V. (2007). Relationship between recovery of calf-muscle biomechanical properties and gait pattern following surgery for Achilles tendon rupture. *Clinical Biomechanics*, 22(2), 211-220.
- Erickson, B. J., Mascarenhas, R., Saltzman, B. M., Walton, D., Lee, S., Cole, B. J. & Bach Jr, B. R. (2015). Is operative treatment of Achilles tendon ruptures superior to nonoperative treatment? A systematic

- review of overlapping meta-analyses. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 3(4), 2325967115579188.
- Francis, P., Whatman, C., Sheerin, K., Hume, P. & Johnson, M. I. (2019). The proportion of lower limb running injuries by gender, anatomical location and specific pathology: a systematic review. *Journal of Sports Science & Medicine*, 18(1), 21.
- Giddings, V. L., Beaupre, G. S., Whalen, R. T. & Carter, D. R. (2000). Calcaneal loading during walking and running. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 32(3), 627-634.
- Heiderscheit, B. C., Chumanov, E. S., Michalski, M. P., Wille, C. M. & Ryan, M. B. (2011). Effects of step rate manipulation on joint mechanics during running. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 43(2), 296.
- Houshian, S., Tscherning, T. & Riegels-Nielsen, P. (1998). The Epidemiology of Achilles tendon rupture in a Danish county. *Injury*, 29(9), 651-654.
- Jandacka, D., Zahradnik, D., Foldyna, K. & Hamill, J. (2013). Running biomechanics in a long-term monitored recreational athlete with a history of Achilles tendon rupture. *Case Reports*, 2013, bcr-2012007370.
- Jandacka, D., Silvernail, J. F., Uchytíl, J., Zahradnik, D., Farana, R. & Hamill, J. (2017). Do athletes alter their running mechanics after an Achilles tendon rupture?. *Journal of Foot and Ankle Research*, 10(1), 53.
- Kim, J. B., Ha, S. H., Park, S. H., Yoon, S. H., Ryu, J. S. & Part, S. K. (2019). Comparison of Physical Characteristics and Lower Extremity Biomechanics of Elderly and Young Adult Runners. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 29(3), 145-155.
- Komi, P. V. (1990). Relevance of *in vivo* force measurements to human biomechanics. *Journal of Biomechanics*, 23, 23-34.
- Lantto, I., Heikkinen, J., Flinkkilä, T., Ohtonen, P. & Leppilähti, J. (2015). Epidemiology of Achilles tendon ruptures: Increasing incidence over a 33-year period. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 25(1), e133-e138.
- Lee, Y. S., Ryu, S. H., Gil, H. J. & Park, S. K. (2021). Impact and Shock Attenuation of the Runners with and without Low Back Pain. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 31(1), 16-23.
- Marcolin, G., Buriani, A., Balasso, A., Villaminar, R. & Petrone, N. (2015). Gait analysis before and after achilles tendon surgical suture in a single-subject study: A case report. *The Journal of Foot and Ankle Surgery*, 54(2), 247-250.
- Nilsson-Helander, K., Thomeé, R., Grävare-Silbernagel, K., Thomeé, P., Faxén, E., Eriksson, B. I. & Karlsson, J. (2007). The Achilles tendon total rupture score (ATRS) development and validation. *The American Journal of Sports Medicine*, 35(3), 421-426.
- O'Brien, M. (2005). The anatomy of the Achilles tendon. *Foot and Ankle Clinics*, 10(2), 225-238.
- Park, W. S., Lee, M. J., Kang, J. M. & Lee, S. Y. (2018). Comparative Study of Clinical Outcome of Three Surgical Techniques in the Achilles Tendon Rupture: Open Repair, Percutaneous Repair, and Minimal Incision Repair by Achillon. *Journal of Korean Foot & Ankle Society*, 22(2), 68-73.
- Porter, D. A., Barnes, A. F., Rund, A. M., Kaz, A. J., Tyndall, J. A. & Millis, A. A. (2014). Acute Achilles tendon repair: strength outcomes after an acute bout of exercise in recreational athletes. *Foot & Ankle International*, 35(2), 123-130.
- Rebecato, A., Santini, S., Salmaso, G. & Nogarin, L. (2001). Repair of the Achilles tendon rupture: a functional comparison of three surgical techniques. *The Journal of Foot and Ankle Surgery*, 40(4), 188-194.
- Ryu, J. S. (2019). Complexity Pattern of Center of Pressure between Genders via Increasing Running Speed. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 29(4), 247-254.
- Sadeghi, H., Allard, P., Prince, F. & Labelle, H. (2000). Symmetry and limb dominance in able-bodied gait: a review. *Gait & Posture*, 12(1), 34-45.
- Schepesis, A. A., Jones, H. & Haas, A. L. (2002). Achilles tendon disorders in athletes. *The American Journal of Sports Medicine*, 30(2), 287-305.
- So, V. & Pollard, H. (1997). Management of Achilles tendon disorders: a case review. *Australasian Chiropractic & Osteopathy*, 6(2), 58.
- Starkey, C. & Ryan, J. L. (2002). Evaluation of orthopedic and athletic athletes. *Philadelphia: FA Davis Co*, 39, 82.
- Tengman, T. & Riad, J. (2013). Three-dimensional gait analysis following Achilles tendon rupture with nonsurgical treatment reveals long-term deficiencies in muscle strength and function. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 1(4), 2325967113504734.
- White, D. W., Wenke, J. C., Mosely, D. S., Mountcastle, S. B. & Basamania, C. J. (2007). Incidence of major tendon ruptures and anterior cruciate ligament tears in US Army soldiers. *The American Journal of Sports Medicine*, 35(8), 1308-1314.
- Willy, R. W., Brorsson, A., Powell, H. C., Willson, J. D., Tranberg, R. & Grävare Silbernagel, K. (2017). Elevated knee joint kinetics and reduced ankle kinetics are present during jogging and hopping after Achilles tendon ruptures. *The American Journal of Sports Medicine*, 45(5), 1124-1133.
- Zellers, J. A., Carmont, M. R. & Silbernagel, K. G. (2016). Return to play post-Achilles tendon rupture: a systematic review and meta-analysis of rate and measures of return to play. *British Journal of Sports Medicine*, 50(21), 1325-1332.