

인체 족저굴곡근의 근력과 아킬레스 건의 경도, 기능적 능력 간 상관관계 분석

한성원¹ · 이대연² · 이해동³

¹연세대학교 일반대학원 체육학과, ²강남대학교 미래인재개발대학 실버산업공학과,

³연세대학교 교육과학대학 체육교육학과

Relationship between Muscle Strength and Tendon Stiffness of the Ankle Plantarflexors and Its functional Consequence

Seong-Won Han¹ · Dae-Yeon Lee² · Hae-Dong Lee³

¹Department of Physical Education, Graduate School of Yonsei University, Seoul, Korea

²Department of Silver Industrial Engineering, College of Future Human Resource Development, Kangnam University, Yongin, Korea

³Department of Physical Education, College of Education Science, Yonsei University, Seoul, Korea

Received 30 January 2014; Received in revised form 8 March 2014; Accepted 17 March 2014

ABSTRACT

Tendon elasticity is an important factor affecting muscle function and thus human movements. It has been reported that the mechanical properties of tendon are adaptable to external loading condition. Based on the adaptability of muscle and tendon to external loading conditions, one can assume that there might be an optimum ratio between muscle strength and tendon stiffness. The present study aimed to investigate whether there is correlation between plantar flexor muscle strength and stiffness of the achilles tendon (AT). Twenty two male subjects (age: 23.2±1.5 yrs, height: 175.5±6.2 cm, weight: 75.4±9.8 kg) performed maximum voluntary isometric plantarflexion on a custom-built dynamometer and muscle-tendon junction of the medial gastrocnemius muscle was simultaneously monitored using a real-time ultrasound imaging machine. The averages of muscle force and tendon stiffness were 366.38±79.37 N, 35.34±10.42 N/mm, respectively. Significant positive correlation was observed between muscle strength and tendon stiffness ($r=0.8507$), indicating that the muscle force is proportional to tendon stiffness. The results might have been used in computational modeling and criterion of training progress level in the fields of training and rehabilitation

Keywords : Tendon Stiffness, Muscle Strength, Plantar Flexor

I. 서 론

근육을 뼈에 연결시키고 힘을 전달하는 치밀 결합 조직인 건(tendon)은 역학적 탄성(elasticity)을 가지고 있어 인

체의 움직임에 있어 중요한 역할을 담당하고 있다 (Alexander & Bennet-Clark, 1977; Anderson & Pandy, 1993; Kawakami, Kubo, Kanehisa & Fukunaga, 2002). 탄성을 가진 건과 근육의 수축 요소에 대한 기계학적 특성이나 역할은 두 조직간 독립적인 차이가 존재하지만 기능적으로는 밀접한 관계를 가지고 있다.

보행, 달리기, 도약 등과 같은 신장-수축 사이클 (Stretch-Shortening Cycle [SSC]) 동작에서 외력과 근 수축으로 인해 움직임이 생성될 때 초기 신장 구간에서 근-건 복합체의 길이가 늘어나게 되는데 이때 에너지가 직렬 탄성 성분으로 저장되고 연속되는 수축 구간에서는 그 길

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (NRF-2010-0024090).
Corresponding Author: Hae-Dong Lee
Department of Physical Education College of Education Science, Yonsei University, Seoul, Korea
Tel : +82-2-2123-6188 / Fax : +82-2-2123-8648
E-mail : xbridge1997@yonsei.ac.kr

이가 다시 쏘아짐과 동시에 저장되었던 에너지를 재사용하게 된다(Cavagna, 1977; Komi & Bosco 1978; Roberts, Marsh, Weyand, & Taylor, 1997). 특히 근육이 수축할 경우, 근육과 연결되어 있는 건은 근 수축에 의해 생성된 근력의 크기에 비례하게 신장과 복원이 이루어지는데 이러한 근-건 복합체의 상호작용은 근육에서 담당하는 기계학적인 일을 줄일 수 있는 장점이 있다. 뿐만 아니라 근 섬유가 거의 같은 길이인 상태에서 근력을 발휘하게 함으로써 보다 더 큰 근력을 발생 시킬 수 있다(Roberts, 2002). 이처럼 건의 탄성 성분은 움직임을 유발하는 데 있어 역학적 효율을 담당하고 있기 때문에 인체 내외부의 환경변화와 자극에 따른 건의 기계학적 특성을 반영하는 정도 변화를 이해하는 것은 무엇보다 중요하다고 할 수 있다 (Roberts & Azizi, 2011).

근육과 건의 상호작용을 기반으로 한 근육의 특성이 외부 환경에 따라 변화하게 되면 그에 상응한 방향으로 건의 정도 역시 변화하게 된다. 대표적인 외부자극인 저항성 운동, 순발력 운동 등 다양한 외력이 지속적으로 가해지면 근력과 함께 건의 정도가 증가하며 이러한 자극이 중단 될 경우 운동 전의 수준으로 감소한다는 여러 선행연구가 보고되고 있다(Alexander, 2002; Foure, Nordez, McNair, & Comu, 2011; Kubo, Ikebukuro, Maki, Yata, & Tsunoda, 2012; Kubo, Kanehisa, Ito, & Fukunaga, 2001; Kubo et al., 2006; Reeves, Maganaris, & Narici, 2003).

근력과 건의 정도 간 상관성에서 나아가 건의 정도는 폭발적인 운동에 중요한 부분을 차지하고(Wang, Lin, Su, Shih, & Huang, 2012), 건의 정도가 상대적으로 낮은 수준인 장거리 달리기 선수가 그렇지 않은 선수에 비해 그 기록이 더 좋은 것으로 나타나는 등(Kubo et al., 2010) 운동 수행에 있어 간과할 수 없는 요소이므로 정도 수준에 따른 기능적 차이를 확인하는 것이 중요하다. 아킬레스건의 정도가 직접적으로 운동 수행에 기여하는 동작인 수직반동점프를(Kawakami et al., 2002) 반동이 없는 수직점프와 비교하였을 때 건에서 생성되는 탄성에너지를 측정함으로써 정도와 기능적 동작 사이의 상관관계도 정량화할 수 있다. 이처럼 선행연구를 바탕으로 근육과 건의 특성을 반영하는 족저굴곡근의 근력과 아킬레스건의 정도 수준은 상호 밀접한 관계를 나타내며 근력과 건의 정도 간 유의한 상관성 및 정량화 된 관계를 도출할 수 있다고 제안할 수 있다(Mersmann et al., 2013). 하지만 근력과 건의 정도 간 상관 정도를 정량화한 연구와 기능적 움직임 사이의 관계를 분석한 연구는 부족한 상태이다.

이에 본 연구에서는 인체 족저굴곡근의 근력 수준에 따른 아킬레스건의 정도 차이가 어느 정도인지 상관관계를 분석하여 정량화하고자 하였다. 또한 실제 정도 수준에 따라 기능적 동작의 수준에 차이가 있는지, 아울러 정도 수

준에 따른 기능적 동작 수준 간 상관관계가 있는지를 탄성에너지 사용률(Use of stored elastic energy [USEE])과 기능적 동작인 수직반동 점프의 높이를 측정하여 분석하였다.

II. 연구방법

1. 연구 대상자

본 연구를 위하여 하지 및 건 관련 부상 경험이 없는 20-30대의 건강한 남성 피험자 22명을 모집하였다. 실험에 필요한 피험자 수를 통계적으로 검정하기 위해 G-power (G*Power, HEINRICH HEINE, Dusseldorf, Germany) 프로그램을 이용하였고 선행연구(Boisen-Moller, Magnusson, Rasmussen, Kjaer, & Aagaard, 2005)를 바탕으로 확인된 효과크기는 0.7로 고려하여 산출하였다. 실험 전 실험 목적 및 절차, 위험성에 대한 설명 후 자발적인 실험 참가 동의서를 받았으며 피험자에 대한 정보는 다음과 같다 (Table 1).

Table 1. General characteristics of the subjects

Gender	Age (yrs)	Height (cm)	Weight (kg)
Man	23.2±1.5	175.5±6.2	75.4±9.8

(mean±standard deviation)

2. 실험 절차

모든 피험자는 본 실험에 들어가기 전, 족저굴곡 수행 방법에 대한 설명 후 동작이 익숙해지도록 연습시간을 가졌다. 실험 진행 시 자체 제작한 근력 측정기에서 발목관절의 족저굴곡 10°로 설정 후 최대 등척성 족저굴곡을 3회 수행하게 하였다. 각 횟수 사이에는 피로를 예방하기 위한 충분한 휴식시간이 제공되었고, 수직점프는 다른 날에 동일한 절차로 3회씩 측정하였다(Figure 1).

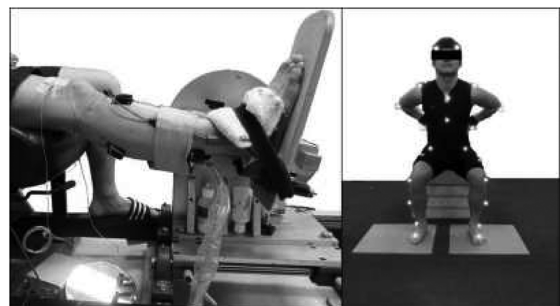


Figure 1. Experimental setting to measure plantarflexor muscle force and the achilles tendon elongation (left) and to identify functional test (right)

2.1. 발목관절의 최대 족저굴곡력 측정

족저굴곡 수행 시 자체 제작한 등척성 근력 측정기(로드 셀 장착, SBS-500L, CAS, Korea)에서 출력되는 관절 모멘트 값을 다음 공식을 사용하여 근력을 산출하였다.

$$F_m = k \times TQ \times MA^{-1}$$

F_m : 족저굴곡근력

k : 내측 비복근이 차지하는 단면적 비율, 18% (Fukunaga, Roy, Shellock, Hodgson, & Edgerton, 1996)

TQ : 관절 모멘트

MA : 발목관절의 모멘트 암 길이, 0.0547 m (Maganaris, 2004)

2.2. 근-건 교차점의 이동거리 측정

아킬레스건의 신장 정도를 측정하기 위해 족저굴곡근-건 교차점의 이동거리를 초음파 영상장치(LogicScan 128 EXT-1Z kit, TELEMED UAD, Lithuania) 및 프로브(LV7.5/60/96Z, Samsung Medison, Korea)를 이용하여 실시간으로 확인하였다(Figure 2).

2.3. 아킬레스건의 경도 추정

아킬레스건의 경도는 근-건 교차점의 변위와 족저굴곡근력의 크기로 계산하였다. 초음파 영상을 통해 족저굴곡근력의 크기가 0일 때 근-건 교차점의 위치를 파악한 후 족저굴곡근력이 최대일 때의 교차점 위치를 확인하였다. 이후 근력이 0인 구간부터 최대인 구간까지 14등분 하여 각

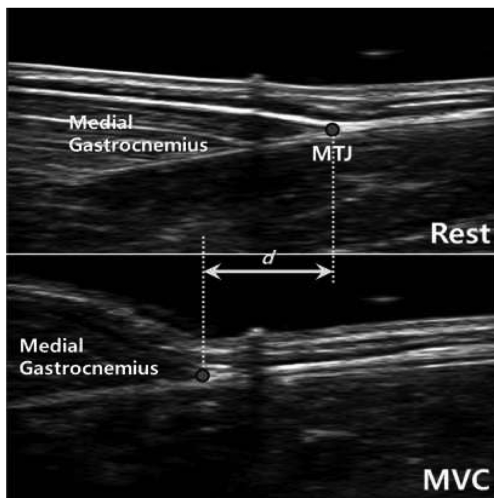


Figure 2. Longitudinal ultrasound images of the medial gastrocnemius muscle-tendon junction at rest (top) and MVC (bottom) and the displacement of the junction from rest to MVC (d)

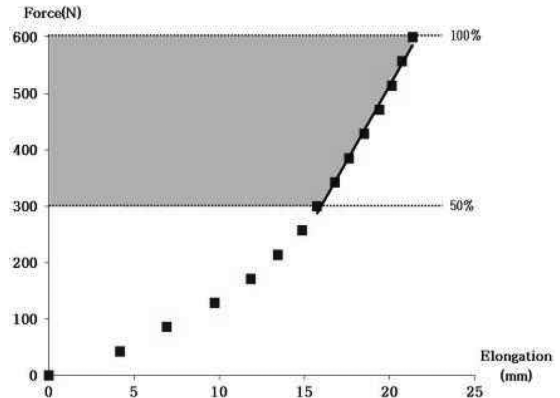


Figure 3. Estimation of tendon stiffness from the muscle force-tendon elongation curve

각의 근력 값에서의 근-건 교차점의 변위를 구하여 경도를 계산하였다. 건의 경도는 근력 발현 수준이 50% 이하일 경우 곡선 형태를 나타내다가 그 수준을 넘어서면 직선형으로 나타난다. 본 연구에서는 선행연구(Kubo et al., 2001)에 따라, 근력 발현 수준이 50% 이상인 구간에서의 근-건 교차점의 위치변화 및 근력 크기를 바탕으로 산출한 기울기를 건의 경도(N/mm)라 정의하였다(Figure 3).

2.4. 탄성에너지 사용률 (USEE) 과 수행능력 측정

건의 경도에 따라 기능의 차이를 보기 위해 수직점프와 수직반동점프 시 사용되는 탄성에너지의 사용률을 지면반력(OR6-7, AMTI, MA)과 신체 무게중심의 속도를 동작분석기(Vicon NEXUS Systems, Oxford Metric Ltd, UK)를 이용하여 측정하였다. 수직점프는 스쿼트 자세에서 시작하였으며, 신체 무게중심의 이동방향이 수직 위 방향으로 향하는 구간부터 지면에서 발이 떨어지는 순간까지 수직점프의 단축성 수축구간이라 설정하였다. 또한 수직반동점프 시 신체 무게중심의 이동 방향이 지면을 향하는 구간을 신장성 수축 구간으로, 신체 무게중심의 이동 방향이 수직 위 방향으로 전환되는 시점부터 점프 시 지면에서 발이 떨어지는 순간을 단축성 수축 구간으로 정의하였다. 구간에 따른 지면 반력의 크기와 신체 무게중심의 속도를 이용하여 일률(Power)을 구하여 탄성 에너지 사용률을 구하였다. 수직 반동점프 시 신장성 수축이 일어나는 과정에서 저장된 탄성에너지를 점프 수행 시 사용할 수 있는 에너지의 양이라 설정한다. 이후 단축성 구간에서 발생하는 두 점프 간 에너지 사용률의 차이가 확인 되면, 이를 통해 저장된 탄성에너지 대비 사용한 탄성에너지의 비율을 확인할 수 있다. 수직점프와 수직반동점프 간의 에너지 사용률을 확인하기 위한 공식은 다음과 같다(Asmussen & Bonde-Petersen, 1974).

$$USEE = \frac{(E_{CMJ-C} - E_{SJ-C})}{E_{CMJ-E}} \times 100$$

USEE: 저장된 탄성에너지의 사용비율(use of stored elastic energy)

E_{CMJ-C} : 수직반동점프 시 족저굴곡근의 단축성 수축 구간에서의 순수 에너지

E_{SJ-C} : 수직점프 시 족저굴곡근의 단축성 수축 구간에서의 순수 에너지

E_{CMJ-E} : 수직반동점프 시 족저굴곡근의 신장성 수축 구간에서의 순수 에너지

신체의 무게중심점을 이용하여 Z축 방향으로 동작중의 최저점과 최고점을 확인하여 수직점프와 수직 반동점프 간 높이 차이를 확인하였다.

2.5. 자료 수집

족저굴곡근-건 복합체의 기계학적 특성을 파악하기 위해 근력측정기와 근전도 측정 장비에서 출력되는 신호 및 초음파 영상장치를 동기화 하여 데이터를 얻었다. 근력 측정기에서는 보조 출력 단자를 통하여 발목관절 모멘트 값을 아날로그 신호(input range: ± 5 voltage)로 확인하였다. 근력 측정기로부터의 발목관절 모멘트와 근전도 신호를 Analog/Digital Board (Multifunction DAQ Model NI-6036E, National Instrument, USA)를 거쳐 Labview 8.5(National Instrument, USA) 를 이용하여 제작한 데이터 수집 프로그램으로 확인하였다. 수집빈도는 등척성 근력측정기의 경우 2000 Hz, 근전도 2000 Hz(대역폭 20-450 Hz), 그리고 초음파 영상장치는 40 Hz로 각각 설정한 후 측정하고 컴퓨터에 저장하였다. 사후 분석 시 수집빈도를 맞추기 위해 등척성 근력측정기 및 근전도 자료는 Labview 8.5를 이용하여 제작한 프로그램을 바탕으로 40 Hz를 기준, 리 샘플링 하였다.

총 3회의 등척성 최대 족저굴곡 수행 중 <Figure 4>와 같이 초반의 점진적인 근력 발현 증가구간과 후반의 최대 족저굴곡근력 유지구간이 각 3초씩 성공적으로 이루어진 1회 자료를 선정하여 분석에 사용하였다. 또한 수직 점프 동작 역시 3회 중 가장 높은 기록을 나타낸 수행 1회를 바탕으로 분석하였다.

2.6. 통계 분석

아킬레스건의 경도에 따른 족저굴곡근의 근력 관계는 SPSS 18.0(IBM, USA)을 이용하여 선형 회귀 분석 및 상관관계 분석을 실시하였고, 이후 건의 경도 수준이 기능적 동작에 미치는 영향을 알아보기 위해 상관관계분석을 실시하였다. 유의수준은 $\alpha=.05$ 이었다.

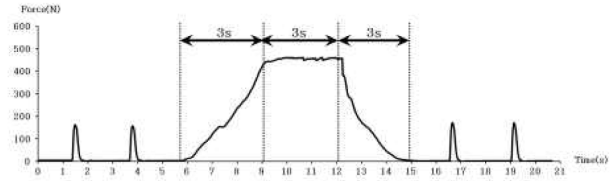


Figure 4. Protocol for the measurement of ankle plantarflexion force

III. 결 과

1. 족저굴곡근의 근력과 아킬레스건의 경도 간 상관관계

<Figure 5>는 힘-경도 관계를 나타내는 그래프로, X축은 최대 근력을, Y 축은 건의 경도를 의미하고 22명의 자료를 모두 표시하였다. 측정된 결과는 <Table 2>에서 확인할 수 있다. 족저굴곡근의 근력 수준이 다양한 피험자를 대상으로 실험한 결과 족저굴곡근의 근력과 아킬레스건의 경도 사이에 높은 수준의 상관관계가 나타났다($r=0.85$, $p=.000$). 그에 따라 상관관계에서 비롯된 특정 기울기가 확인되었고 약 0.11에 수렴하였다.

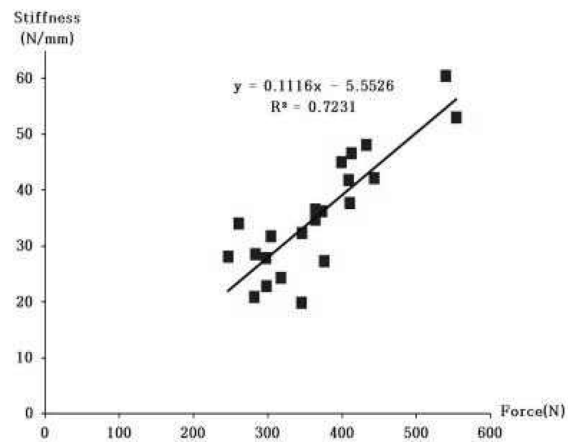


Figure 5. Relationship between muscle force and tendon stiffness (n=22)

Table 2. The values of measured moment through the present experiment, estimated force with the moment value and calculated the Achilles tendon stiffness

Moment (Nm)	Force (N)	Stiffness (N/mm)
111.1 \pm 24.1	366.4 \pm 79.4	35.3 \pm 10.4

(mean \pm standard deviation)

2. 아킬레스건의 경도 수준에 따른 탄성에너지 사용률의 차이

경도의 높고 낮은 수준은 탄성에너지 사용률의 차이

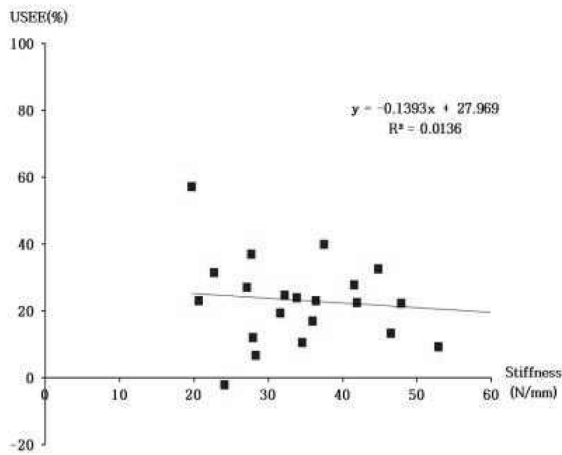


Figure 6. Relationship between USEE and stiffness of tendon (n=22)

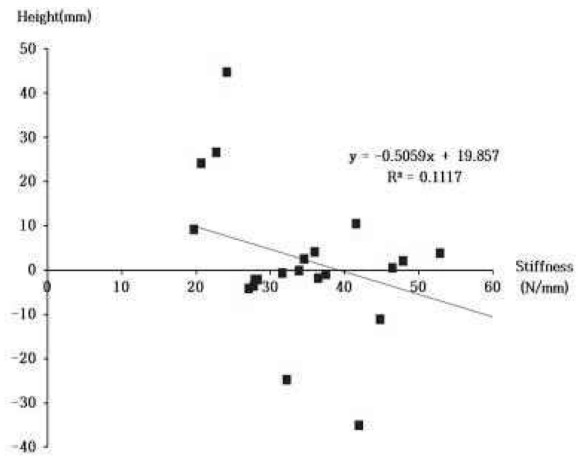


Figure 7. Relationship between jumping height and stiffness (n=22)

Table 3. Measured elastic energy values during squat jump and countermovement jump (N)

E_{CMJ-C}	E_{SJ-C}	E_{CMJ-E}
373.9±67.8	287.7±36.9	78.9±26.8

(mean±standard deviation)

(USEE)와 연관성이 없는 것으로 확인하였다(Figure 6). 선형회귀분석 결과 r^2 값은 0.0136으로, 상관관계분석 결과 상관계수 r 값은 0.117($p=.605$)로 나타났다. 점프 수행 중 발생한 지면반력의 크기로 계산된 각 구간의 탄성에너지는 <Table 3>에 제시하였다.

3. 아킬레스건의 경도 수준에 따른 운동수행력의 차이

<Figure 7>은 건의 경도 수준에 따른 수직점프와 수직 반동점프 간 높이 차이를 의미한다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 아킬레스건의 경도는 운동 수행 차이를 설명하지 못하는 것으로 나타났고 선형회귀분석 결과 r^2 값은 0.1117이며, 상관계수 r 값은 0.33($p=.128$)이었다.

IV. 논 의

발목관절의 움직임 중에서도 특히 족저굴곡은 족저굴곡근의 수축과 아킬레스건의 신장에 의해 이루어지므로 근육과 건의 상호작용 및 유기적인 관계를 분석하고 이해하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 족저굴곡근의 근력과 아킬레스건의 경도 간의 상관관계를 분석하여 이를 정량화 하고자 하였으며 동시에 건의 경도가 기능 및 운동 수행에 미치는 영향을 확인하였다. 그 결과 근력과 건의 경도는 높은 수준의 상관관계가 있는 것으로 나타났다.

이와 같은 연구결과는 족저굴곡근의 근력수준이 높을수

록 아킬레스건의 경도가 큰 경향이 있음을 밝힌 선행연구(Arampatzis, Morey-Klapsing, De Monte, & Stafilidis, 2007)와 유사하였으며, 실험을 통해 확인된 족저굴곡근의 근력 및 아킬레스건의 경도 또한 366.38 ± 79.37 N, 35.34 ± 10.42 N/mm로 선행연구(Kubo et al., 2004; Stafilidis & Arampatzis, 2007)와 비슷한 수준임을 알 수 있었다. 경도의 수준에 따른 탄성에너지 사용률의 차이와 두 점프 간의 높이 차이와는 연관성이 없는 것으로 나타났는데, Kubo 등 (1999) 또한 건의 경도 수준에 따른 운동수행능력의 차이가 유의하게 나타나지 않았다는 결과를 보고한 바 있다. 따라서 족저굴곡근의 근력과 아킬레스건의 경도 간 관계가 특정 비율로 수렴할 것이라는 가설은 받아들일 수 있었으나 건의 경도가 기능적 차이 및 운동수행능력의 차이를 유발한다는 가설은 그러지 못하였다.

본 연구의 족저굴곡근 근력과 건의 경도 간 비율은 0.11로, 실험방법과 근력추정방식이 유사한 선행연구(Kubo, 2011; Kubo, Akima, et al., 2004; Kubo, Kanehisa, & Fukunaga, 2002; Kubo, Tabata, et al., 2010)에서 제시한 평균값과 비교했을 때 유사성을 확인할 수 있었다(Figure 8). 또한, 28명의 단거리 달리기 선수, 28명의 장거리 달리기 선수, 그리고 10명의 운동에 참여하지 않는 일반인 등 총 66명을 대상으로 한 Arampatzis 등 (2007)의 연구에서 근력을 추정하는 방식을 본 실험의 방식으로 다시 계산한 결과 그 기울기가 약 0.11로 나타나 본 연구와 비슷한 수준임을 확인하였다. 근력과 건의 경도 간 정량화 된 기울기는 여러 가지로 적용 될 수 있는데 특히, 근력 수준을 바탕으로 근력 크기에 상응하는 건의 경도 수준을 유추할 수 있다는 점에서 의미를 갖는다. 본 연구 결과는 근력 크기 대비 0.11 정도의 수준이 정상 성인일 경우의 값으로 도출 되었고 만일 이 수준보다 높거나 낮다

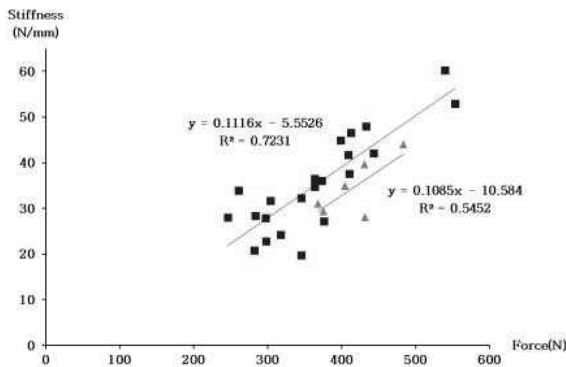


Figure 8. Comparison with the results of preceding researches (Kubo et al., 2002, 2004, 2010, 2011). The results of present study is represented by square figure while triangle figure means the results of the preceding researches.

면 상해의 위험이 높아질 가능성이 있을 것으로 추측할 수 있다. 근력 크기 대비 건의 경도수준이 0.11보다 낮다면 이는 근력의 크기에 비해 건의 경도 수준이 보다 낮은 것이 되며 이는 근 수축 시 건의 과신장이 일어날 가능성이 높을 것으로 예상된다. 반대로 0.11보다 높다면 건의 경도가 근력 수준에 비해 과도하게 높은 상태임을 의미하고 이는 보행, 달리기 등 발목관절 움직임이 유발될 때 탄성 에너지를 효율적으로 이용할 수 없게 될 가능성이 높아질 것이라 예상된다. 청소년 배구선수의 경우 과거 배구 선수 경력에 있는 성인에 비해 건의 경도와 그 단면적은 낮았으나 근력은 유의하게 높았고 이러한 불균형은 건의 과사용으로 인한 부상 위험과 관계가 있을 것이라 밝힌 선행연구가 이를 뒷받침한다(Mersmann et al., 2013). 이와 더불어, 근력과 건의 경도 간 적정 수준은 훈련 및 재활운동 시 족저굴곡근-건 복합체의 발달 정도를 파악하여 훈련이나 재활과정의 진행 정도를 확인하는데 적용할 수 있음을 의미한다.

근력과 건의 경도 간의 정량화 된 관계가 갖는 또 다른 의미는 모델링에 부여될 수 있다. 인체 내 조직을 최대한 실제 조직과 유사하게 설정하여 가동하고자 하는 모델링에서 건을 강체로 보거나 혹은 사체에서 얻은 자료를 기반으로 건을 묘사한다(Maceri, Marino & Vairo, 2012; Ali, Andersen, Rasmussen, Robertson, & Rouhi, 2013). 본 연구 결과를 이용한다면 근력에서 건의 경도 수준을 추정하여 모델링을 수행할 시 건에 대한 정보를 개인 특성에 더 가깝게 구현해 낼 수 있을 것이다.

건의 경도 수준이 낮으면 관절 움직임을 유발하기 위한 근 수축 전달 능력이 저하될 수 있기 때문에(Roberts et al., 2002) 보다 높은 수준의 경도를 가진 건이 근 수축에 의한 힘을 관절에 전달하는데 적절하다(Biewener &

Roberts, 2000; Fletcher, Esau, & MacIntosh, 2010). 따라서 건의 경도 수준이 높을수록 탄성 에너지를 저장하고 방출하는데 효율적이라고 할 수 있다. 공식을 이용하여 산출했을 때 탄성 에너지 사용률의 차이가 클수록 에너지를 저장하고 사용하는 능력이 효율적임을 나타내는데, 본 실험 결과 건의 경도 수준에 따른 탄성 에너지 사용률 차이가 나타나지 않았다. 모델링을 이용하거나, 사람이 아닌 동물들의 건을 대상으로 한 선행연구결과와 차이를 보이는 원인은 탄성 에너지 사용률 추정 방식에 대한 차이에서 비롯된 것이라 판단된다.

건의 경도 수준에 따라 수직점프와 수직반동점프 간 높이 차이 간 상관관계가 없다는 결과를 바탕으로 두 종류의 점프가 아킬레스건의 기계학적 특성을 확인하기에 적합하지 않은 척도임을 확인할 수 있었다. 수직 점프와 수직 반동 점프 간 높이 차이는 체중과 근육의 두께(muscle thickness)와 상호 연관성이 있다는 결과를 보고한 선행연구에서도 건의 경도는 점프 높이와는 독립적인 것으로 보고된 바 있으며, 이를 확인하기 위해 건의 경도 수준이 높고 낮음에 따라 피험자를 두 그룹으로 나눈 후 체중과 근육의 두께 등 점프 높이와 상관성이 있는 요소들과 비교한 연구에서도 유의하게 다르지 않은 것으로 나타났다(Kubo et al., 1999). 본 연구결과 또한 피험자 간 경도의 높고 낮은 수준의 차이는 존재하였으나 근육의 크기가 유의하게 다르지 않았기 때문이라 생각할 수 있다. 점프 높이와 아킬레스건의 경도 간 상관관계를 갖는다는 선행연구결과(Burgess, Connick, Graham-Smith, & Pearson, 2007)와 본 연구에서의 결과가 서로 다른 이유는 점프 자세에 기인한다고 볼 수 있다. Burgess 등 (2007)의 연구에서는 직립으로 서 있게 한 뒤 순수한 족저굴곡을 이용하여 수직 위 방향으로 점프를 수행하게 하였다. 이와 달리, 본 연구에서 수행한 점프는 족저굴곡근-건 복합체와 함께 대퇴사두근과 같이 이외의 근육군이 함께 동원된 결과라 할 수 있다. 서로 다른 근육군들이 이루어내는 협응 및 동작의 기술적 요인이 복합적으로 작용하여 순수한 건의 경도를 확인하는데 방해요인이 되었을 가능성이 있다. 또한 건의 경도와 기능적 차이 간 관계를 밝히기 위해 구조적인 특성을 반영한 건의 경도에서 나아가 재료학적으로 접근하여 건의 경도를 확인해 볼 필요가 있을 것으로 요구된다. 건의 구조적인 특성은 비슷하더라도 건에 작용하는 힘을 같은 단면적 기준으로 계산하여 확인한다면 그 결과가 달리 나타날 가능성이 있기 때문이다.

또한 아킬레스건에 작용하는 힘의 크기를 추정할 경우 피험자 개인의 아킬레스건 모멘트 암을 적용하여 계산하여야 했으나, 모든 피험자를 대상으로 MRI를 촬영하는 데 어려움이 있었으므로 선행연구(Maganaris, 2004; Maganaris, Baltzopoulos, & Sargeant, 1998)에서 제시한 모멘트 암의

값을 인용하였다. 아킬레스건의 경도를 확인하기 위한 여러 선행연구(Arampatzis, Peper, Bierbaum, & Albracht, 2010; Hansen, Aagaard, Kjaer, Larsson, Magnusson, 2003; Kubo et al., 2007; 2010)에서 역시 본 연구에서 참고한 값을 이용하여 건에 작용하는 힘을 추정하였기 때문에 정확성은 감소하나 큰 영향을 미치지 않을 것이라 판단된다.

V. 결 론

본 연구는 인체 족저굴곡근의 근력과 아킬레스건의 경도 간 상관관계를 정량화 하고 경도 수준이 동작 시 탄성에너지 사용률과 기능적 동작에 미치는 영향의 정도를 파악하기 위하여 초음파 영상 장비와 동력계, 영상분석 장비와 지면반력기를 사용하여 근력, 경도, 탄성에너지 사용률, 수직점프의 높이를 비교 분석하였다. 그 결과 근력 수준에 따른 건의 경도는 높은 상관관계를 가지는 것으로 나타났으나($r=0.85$), 경도 수준에 따른 탄성에너지 사용율의 차이($r=0.117$)와 수직 점프의 높이($r=0.33$)는 상관관계가 높지 않은 것으로 나타났다.

이와 같은 결과는 근력-경도 관계 그래프를 사용하여 근력과 이에 상응하는 적절한 건의 경도를 추정하는 것이 가능하며 이를 현장에서 평가 기준 자료로 활용할 수 있음을 의미한다. 그러나 기능적 동작과 수준의 차이에 대한 연구는 여전히 여러 연구결과가 상반되게 제시되고 있는 만큼 다른 기능적 동작과 분절의 관계 등 다양한 접근을 통한 지속적인 후속연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- Alexander, R. M. (2002). Tendon elasticity and muscle function. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 133(4), 1001-1011.
- Alexander, R. M., & Bennet-Clark, H. C. (1977). Storage of elastic strain energy in muscle and other tissues. *Nature*, 265(5590), 114-117.
- Ali, N., Andersen, M. S., Rasmussen, J., Robertson, D. G., & Rouhi, G. (2013). The application of musculoskeletal modeling to investigate gender bias in non-contact ACL injury rate during single-leg landings. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 15(10), 1080-1094.
- Anderson, F. C., & Pandy, M. G. (1993). Storage and utilization of elastic strain energy during jumping. *Journal of biomechanics*, 26(12), 1413-1427.
- Arampatzis, A., Karamanidis, K., Morey-Klapsing, G., De Monte, G., & Stafiliadis, S. (2007). Mechanical properties of the triceps surae tendon and aponeurosis in relation to intensity of sport activity. *Journal of Biomechanics*, 40(9), 1946-1952.
- Arampatzis, A., Peper, A., Bierbaum, S., & Albracht, K. (2010). Plasticity of human Achilles tendon mechanical and morphological properties in response to cyclic strain. *Journal of Biomechanics*, 43(16), 3073-3079.
- Asmussen, E., & Bonde-Petersen, F. (1974). Apparent efficiency and storage of elastic energy in human muscles during exercise. *Acta Physiologica Scandinavica*, 92(4), 537-545.
- Biewener, A. A., & Roberts, T. J. (2000). Muscle and tendon contributions to force, work, and elastic energy savings: a comparative perspective. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 28(3), 99-107.
- Bojsen-Moller, J., Magnusson, S. P., Rasmussen, L. R., Kjaer, M., & Aagaard, P. (2005). Muscle performance during maximal isometric and dynamic contractions is influenced by the stiffness of the tendinous structures. *Journal of Applied Physiology*, 99(3), 986-994.
- Burgess, K. E., Connick, M. J., Graham-Smith, P., & Pearson, S. J. (2007). Plyometric vs. isometric training influences on tendon properties and muscle output. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 21(3), 986-989.
- Cavagna, G. A. (1977). Storage and utilization of elastic energy in skeletal muscle. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 5, 89-129.
- Fletcher, J. R., Esau, S. P., & MacIntosh, B. R. (2010). Changes in tendon stiffness and running economy in highly trained distance runners. *European Journal of Applied Physiology*, 110(5), 1037-1046.
- Fouré, A., Nordez, A., McNair, P., & Cornu, C. (2011). Effects of plyometric training on both active and passive parts of the plantarflexors series elastic component stiffness of muscle-tendon complex. *European Journal of Applied Physiology*, 111(3), 539-548.
- Fukunaga, T., Roy, R. R., Shellock, F. G., Hodgson, J. A., & Edgerton, V. R. (1996). Specific tension of human plantar flexors and dorsiflexors. *Journal of Applied Physiology*, 80(1), 158-165.
- Hansen, P., Aagaard, P., Kjaer, M., Larsson, B., & Magnusson, S. P. (2003). Effect of habitual running on human Achilles tendon load-deformation properties and cross-sectional area. *Journal of Applied Physiology*, 95(6), 2375-2380.
- Kawakami, Y., Kubo, K., Kanehisa, H., & Fukunaga, T. (2002). Effect of series elasticity on isokinetic torque-angle relationship in humans. *European Journal of Applied Physiology*, 87(4-5), 381-387.
- Komi, P. V., & Bosco, C. (1978). Utilization of stored elastic energy in leg extensor muscles by men and women. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 10(4), 261-265.
- Kubo, K. (2011). Morphological and mechanical properties of muscle and tendon in highly trained sprinters. *Journal of Applied Biomechanics*, 27(4), 336-344.
- Kubo, K., Akima, H., Ushiyama, J., Tabata, I., Fukuoka, H., Kanehisa, H., & Fukunaga, T. (2004). Effects of 20 days of bed rest on the viscoelastic properties of tendon structures in lower limb muscles. *British Journal of Sports Medicine*, 38(3), 324-330.
- Kubo, K., Ikebukuro, T., Maki, A., Yata, H., & Tsunoda, N. (2012). Time course of changes in the human Achilles tendon properties and metabolism during training and detraining in vivo. *European Journal of Applied Physiology*, 112(7), 2679-2691.
- Kubo, K., Kanehisa, H., & Fukunaga, T. (2002). Effect of stretching

- training on the viscoelastic properties of human tendon structures in vivo. *Journal of Applied Physiology*, 92(2), 595-601.
- Kubo, K., Kanehisa, H., Ito, M., & Fukunaga, T. (2001). Effects of isometric training on the elasticity of human tendon structures in vivo. *Journal of Applied Physiology*, 91(1), 26-32.
- Kubo, K., Kawakami, Y., & Fukunaga, T. (1999). Influence of elastic properties of tendon structures on jump performance in humans. *Journal of Applied Physiology*, 87(6), 2090-2096.
- Kubo, K., Morimoto, M., Komuro, T., Tsunoda, N., Kanehisa, H., & Fukunaga, T. (2007). Influences of tendon stiffness, joint stiffness, and electromyographic activity on jump performances using single joint. *European Journal of Applied Physiology*, 99(3), 235-243.
- Kubo, K., Ohgo, K., Takeishi, R., Yoshinaga, K., Tsunoda, N., Kanehisa, H., & Fukunaga, T. (2006). Effects of isometric training at different knee angles on the muscle-tendon complex in vivo. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 16(3), 159-167.
- Kubo, K., Tabata, T., Ikebukuro, T., Igarashi, K., Yata, H., & Tsunoda, N. (2010). Effects of mechanical properties of muscle and tendon on performance in long distance runners. *European Journal of Applied Physiology*, 110(3), 507-514.
- Maceri, F., Marino, M., & Vairo, G. (2012). An insight on multiscale tendon modeling in muscle-tendon integrated behavior. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, 11(3-4), 505-517.
- Maganaris, C. N. (2004). A predictive model of moment-angle characteristics in human skeletal muscle: application and validation in muscles across the ankle joint. *Journal of Theoretical Biology*, 230(1), 89-98.
- Maganaris, C. N., Baltzopoulos, V., & Sargeant, A. J. (1998). Changes in Achilles tendon moment arm from rest to maximum isometric plantarflexion: in vivo observations in man. *The Journal of Physiology*, 510(3), 977-985.
- Mersmann, F., Bohm, S., Schroll, A., Boeth, H., Duda, G., & Arampatzis, A. (2013). *Evidence of imbalanced adaptation between muscle and tendon in adolescent athletes*. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*.
- Reeves, N. D., Maganaris, C. N., & Narici, M. V. (2003). Effect of strength training on human patella tendon mechanical properties of older individuals. *The Journal of Physiology*, 548(3), 971-981.
- Roberts, T. J. (2002). The integrated function of muscles and tendons during locomotion. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 133(4), 1087-1099.
- Roberts, T. J., & Azizi, E. (2011). Flexible mechanisms: the diverse roles of biological springs in vertebrate movement. *The Journal of Experimental Biology*, 214, 353-361.
- Roberts, T. J., Marsh, R. L., Weyand, P. G., & Taylor, C. R. (1997). Muscular force in running turkeys: the economy of minimizing work. *Science*, 275(5303), 1113-1115.
- Stafilidis, S., & Arampatzis, A. (2007). Muscle-tendon unit mechanical and morphological properties and sprint performance. *Journal of Sports Sciences*, 25(9), 1035-1046.
- Wang, H. K., Lin, K. H., Su, S. C., Shih, T. T., & Huang, Y. C. (2012). Effects of tendon viscoelasticity in Achilles tendinosis on explosive performance and clinical severity in athletes. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 22(6), 147-155.