

대한물리치료과학회지

Journal of Korean Physical Therapy Science
2026. 06. Vol. 33, No.2 pp. 74-88

몸통 안정화 운동이 만성 요통 대학생의 보행 효율에 미치는 영향과 예측요인

박기현¹ · 김동현²

¹동호정형외과 · ²영남대학교 생활과학연구소

Trunk Stabilization Exercise Improves Gait Efficiency in College Students With Chronic Low Back Pain: A Predictive Analysis

Ki Hyeon Park¹, Ph.D., P.T. · Dong Hyun Kim², Ph.D., P.T.

¹*Dept. of physiotherapy center, DongHo Orthopedic Clinic*

²*Institute of Human Ecology, Yeungnam University*

Abstract

Background: Low back pain (LBP) in young adults is increasingly associated with impaired neuromuscular control and reduced gait efficiency. Although trunk stabilization exercise (TSE) is known to improve pain, muscle activation, and functional movement, the integrated mechanisms and predictors underlying gait improvement remain unclear.

Design: Prospective pre-post intervention study.

Methods: Twenty-seven university students with LBP participated in a 4-week TSE program (40 minutes/day, 5 days/week). Pre- and post-intervention assessments included spatiotemporal gait variables (stride length, stance phase, single-limb stance), lower-limb joint angles, and electromyographic muscle activation (RF, TA, BF, SOL, GCM, POP) during gait. Pain intensity (VAS) and functional disability (K-ODI) were also evaluated. Repeated measures ANOVA was used to determine pre-post changes, and multiple linear regression analysis was performed to identify predictors of stride length improvement.

Results: The TSE program significantly reduced pain and disability ($p < 0.001$) and improved stride length,

stance symmetry, and hip flexion angle ($p < 0.05$). The regression model significantly predicted stride length improvement ($\text{Adj. } R^2 = 0.629$, $p = 0.009$). Baseline stride stability ($\beta = 0.78$, $p = 0.001$) and pain reduction ($\beta = 0.39$, $p = 0.014$) were identified as the strongest predictors. Changes in TA activation and disability showed recovery trends but were not statistically significant predictors.

Conclusion: A 4-week TSE program effectively improved gait efficiency in young adults with LBP. The findings suggest that baseline gait stability and the magnitude of pain reduction are key determinants of stride length improvement. Clinically, assessing initial gait stability may help predict treatment outcomes and tailor rehabilitation strategies.

Key words: Gait efficiency, Low back pain, Muscle activation, Stride length, Trunk stabilization exercise

교신저자

김동현

38541 경상북도 경산시 대학로 280 영남대학교

T ※ 개인정보 표시제한 : E: ptpkh2@gmail.com

I. 서론

만성 요통(Low Back Pain, LBP)은 성인의 70~85%가 일생 동안 한 번 이상 경험하는 흔한 근골격계 질환으로, 3개월 이상 통증이 지속될 경우 만성으로 분류되며 단순 통증을 넘어 보행, 근활성 및 일상생활 수행능력(disability) 저하를 초래한다(Ahn 등, 2024; Hartvigsen 등, 2018). 최근 장시간 좌식생활과 스마트기기 사용 증가, 신체활동 감소와 같은 생활양식의 변화로 대학생을 포함한 젊은 성인층의 요통 유병률이 증가하고 있으며, 이들 연령층의 LBP는 구조적 퇴행보다는 자세 조절(postural control) 능력 저하와 척추 안정화 근육의 기능 부전이 주요 원인으로 보고된다(Alshehri 등, 2023; Jeong 등, 2022). 이러한 기능적 특성을 보이는 만성 요통 환자는 보행 시 몸통 움직임의 변동성(variability)은 증가하나 안정성(stability)은 오히려 감소하는 경향을 보이는데, 이는 통증 및 공포 회피 반응과 연관되어 악순환을 유발한다(Nishi 등, 2021). 따라서 젊은 만성 요통 환자에게는 단순한 통증 완화를 넘어 통증, 보행 역학, 근활성 및 자세 교정을 포괄하는 다차원적 중재(multidimensional treatment)가 요구된다(In 등, 2021; Gorji 등, 2022).

보행은 다리 관절의 분절 운동만으로 설명되기보다 몸통 안정성(trunk stability)과 신경근 조절(neuromuscular control)이 통합되어야 가능한 복합 과제이다(Saito 등, 2023). 그러나 만성 요통(LBP) 및 허리 디스크(LDH) 환자는 통증을 회피하고 균형을 유지하기 위해 보폭(stride length)과 한 발짝 길이(step length)를 줄이고, 전체 지지기(stance phase) 비율을 늘리며, 단하지 지지기(single support time)를 단축하는 경향이 있다(Smith 등, 2022; Bonab 등, 2023). 이러한 보행 패턴의 변화와 근육의 비효율적인 동시 수축(co-contraction)은 기능장애지수(ODI) 악화와 밀접한 양의 상관관계를 보이며, 이는 고령자뿐만 아니라 환자의 낙상 위험을 높이는 요인이 된다(Wang 등, 2020; Ge 등, 2021). 특히 대학생을 포함한 젊은 성인에서의 요통은 학업 성취도, 수업 출석 및 일상생활(daily life)에 부정적인 영향을 미칠 수 있어 조기 관리가 중요하다(Ilic 등, 2021; Rožac과 Mikšić, 2021).

통증 자체는 보행 변형의 핵심 요인이다. 통증은 근경직을 유발하고, 경직은 다시 통증을 높이는 악순환(pain-spasm-pain cycle)을 형성하거나 통증 적응 기전을 통해 근육의 활성 패턴을 변화시킨다(Alavi Mehr 등, 2022; Ghamkhar와 Kahlaee, 2021). 선행연구에 따르면 허리 디스크(LDH) 및 척추관 협착증(LSS) 환자는 보행 중 넙다리곧은근(Rectus Femoris, RF)과 앞정강근(Tibialis Anterior, TA)뿐만 아니라, 넙다리두갈래근(Biceps Femoris, BF)과 장딴지근(Gastrocnemius, GCM)에서도 대조군에 비해 높은 근활성도(RMS) 혹은 과도한 동시 수축(co-contraction)을 보인다고 보고하였다(Wang 등, 2020; Zileli와 Cankaya, 2022). 이러한 하지 근육의 비효율적인 과활성과 동시 수축 증가는 통증 회피 및 척추 안정화를 위한 보상 전략으로 작용하지만, 결과적으로 에너지 소비를 높이고 보행 효율을 저해하며 기능 장애(ODI)와 연관된다(Wang 등, 2020). 따라서 만성 LBP 대상자의 보행 평가 시 시공간 변수뿐만 아니라 하지 근육의 과활성 및 동시 수축 패턴을 함께 고려할 필요가 있다.

몸통 안정화 운동(trunk stabilization exercise, TSE)은 이러한 기전을 교정하기 위한 대표적인 중재로, 배가로근(TrA)과 뭇갈래근(Multifidus) 등 심부 안정화 근육의 선행적 조절을 회복시켜 허리뼈-골반 복합체의 안정성을 높이고 통증과 기능장애를 동시에 개선한다(Kim과 Yim, 2020; In 등, 2021). 선행 연구에 따르면 TSE와 같은 운동 중재는 통증(VAS)을 약 42% 감소시키고 기능장애지수(ODI/RMDQ)를 54%까지 유의하게 개선시키며, 정적 및 동적 균형 능력과 보행 속도(TUG, 10MWT)를 향상시켜 보행 효율을 높인다고 보고되었다(Gorji 등, 2022; Lee 등, 2020). 이는 몸통 안정성이 회복됨에 따라 통증으로 인한 허리 및 하지 근육의 비효율적인 동시 수축(co-contraction)과 보상 작용이 줄어들고, 신경근 조절이 정상화되어 신체 기능이 회복되기 때문으로 해석된다(Wang 등, 2020; Kim과 Yim, 2020).

기존 연구들은 주로 통증이나 기능 수준과 같은 단일 지표에 초점을 두거나, 보행 시공간 변수·근활성·관절각을 각각

분리하여 분석하는 경향이 있어, 중재가 보행 효율을 어떤 기전을 통해 회복시키는지 통합적으로 설명하는 데 한계가 있었다(Wernli 등, 2020). 다시 말해, 통증 감소나 증상 완화가 근활성 패턴 조절 및 척추 운동학적 변화로 이어지고, 이러한 신경근 변화가 궁극적으로 보행 효율에 어떻게 기여하는지를 하나의 분석 틀에서 동기화하여 검증한 연구는 매우 드물다(Xu 등, 2025; Christe 등, 2021).

한편 본 연구에서 활용된 보행 자료와 근활성·기능 자료는 연구자에 의해 각각 독립적으로 보고된 바 있으나, 선행 연구들은 보행 특성 또는 근활성·기능 변화에만 개별적으로 초점을 두었다는 점에서 한계가 있었다. 두 자료를 통합하여 보행 효율의 예측요인을 규명한 연구는 아직 이루어지지 않았기 때문이다. 이에 본 연구는 두 데이터셋을 비식별화하여 통합 분석함으로써, 기존 연구에서 설명되지 못한 보행 효율 향상의 핵심 기전을 규명하고자 한다.

특히 젊은 성인 만성 LBP를 대상으로 통증, 기능, 보행 시공간 변수, 다리 관절각, 다리 근활성 변화를 동시에 측정하고 이들 간의 연관성을 분석한 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구는 만성 LBP가 있는 젊은 성인을 대상으로 4주간 TSE를 적용한 뒤, 통증·기능·보행·관절각·근활성도의 변화량을 종합적으로 평가하고, 이들 변인이 보행 효율에 미치는 영향을 다중회귀분석을 통해 규명하는 것을 목적으로 한다.

II. 연구방법

1. 연구대상

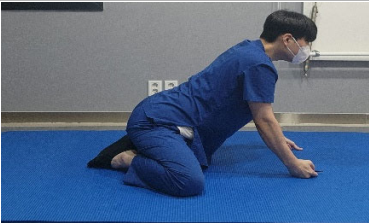
본 연구는 부산광역시에 소재한 OO대학교에 재학 중인 20대 대학생을 대상으로 실시하였다. 표본 수는 G*Power 3.1 프로그램(University of Düsseldorf, Germany)을 이용하여 대응표본 t -검정(paired t -test)에 필요한 유의수준 0.05, 효과크기 0.5(중간 수준), 검정력 0.8로 설정하여 산출하였으며, 그 결과 최소 27명이 필요한 것으로 나타났다. 최종적으로 사전·사후 평가를 모두 완료한 27명의 자료가 분석에 포함되었다. 연구 참여자는 만성적 허리 통증 또는 허리 불편감을 호소하는 자 중, 한국판 오스웨스트리 장애지수(Korean Oswestry Disability Index, K-ODI) 21~40%에 해당하는 중등도 장애 수준을 가진 대학생을 선정하였다. 제외 기준은 다음과 같다: ① 요추 유연성 제한으로 인해 통증이 심한 자, ② 염증성 질환자, ③ 척추 종양 또는 추간판 감염 병력자, ④ 요추 수술 이력이 있는 자, ⑤ 약물치료 또는 물리·운동치료를 병행 중인 자. 모든 대상자는 연구 목적과 절차에 대해 충분한 설명을 들은 후 자발적으로 연구 참여 동의를 작성하였다. 본 연구는 소속 기관 생명윤리위원회(IRB)의 승인(승인번호: 1040621-202509-HR-073)을 받아 수행되었으며, 헬싱키 선언(Declaration of Helsinki)의 윤리 원칙을 준수하였다.

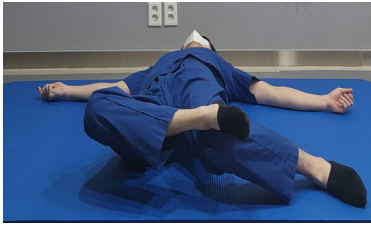
2. 연구절차

본 연구의 몸통 안정화 운동 프로그램은 총 4주간 진행되었으며, 참여자는 연구자가 제작한 동영상 가이드를 활용하여 하루 1회, 40분간 자가 운동을 수행하였다. 프로그램 구성은 선행연구(Kim과 Yim, 2020; Santamaría 등, 2023)를 근거로 스트레칭과 근력 강화운동으로 구성된 16가지 동작으로 이루어졌다. 첫 세션에서는 연구자가 직접 모든 동작을 시범 보이며 정확한 자세와 수행 방법을 지도하였고, 이후에는 참여자가 제공된 동영상을 시청하면서 자가 훈련을 진행하였다. 이때 자가 운동의 순응도(adherence)와 정확성을 보장하기 위해, 모든 대상자는 매일의 운동 수행 여부, 난이도, 통증 강도를 운동 일지(exercise log)에 기록하도록 하였다. 연구자는 주 1회 모바일 메시지를 통해 대상자의 진행 상황을 모니터링하였으며, 필요시 짧은 운동 수행 영상을 요청하여 자세에 대한 피드백을 제공함으로써 정확한 동작 수행을 유도하였다. 근피로가 발생할 경우 세트 간 30초, 동작 간 1분의 휴식을 부여하였으며, 통증이 유발되는 동작은 즉시 제한하였다. 운동 프로그램에 포함된 16개 동작은 다음과 같다(Table 1). 모든 평가는 중재 전·후 동일한

환경과 절차에서 시행하였다. 또한 보행 분석 전에는 Modified Borg Scale(0-10점)을 이용하여, 대상자의 주관적 피로도가 '4점(somewhat strong)' 수준에 도달할 때까지 트레드밀 보행을 실시하여 피로 상태를 유도하였다(Onan 등, 2023). 평균 7-15분 이내에 피로 임계점에 도달하였으며, 즉시 보행 분석을 포함한 모든 측정이 이루어졌다.

Table 1. 운동프로그램.

운동	설명
 1. 개구리자세 + 모음근 스트레칭	목적: 허벅지 안쪽 이완 방법: 무릎을 넓게 벌리고 발끝을 바깥으로 둔다 → 팔을 앞으로 두고 상체를 천천히 앞뒤로 움직인다 → 허벅지 안쪽이 편안하게 늘어나는 느낌 유지(1분).
 2. 개구리자세 + 안쪽 돌림근 강화	목적: 엉덩관절 내회전근 강화 방법: 개구리자세에서 시작 → 무릎을 축으로 다리를 바깥→안쪽으로 돌린다 → 허리가 흔들리지 않게 유지하며 각 다리 15회×2세트.
 3. 개구리자세 + 뒤넓다리근 스트레칭	목적: 뒤넓다리근 이완 방법: 개구리자세에서 한쪽 무릎을 펴 옆으로 뻗는다 → 엉덩이를 뒤로 빼며 허벅지 뒤쪽이 늘어나게 한다 → 1분 유지.
 4. 궁둥구멍근 스트레칭	목적: 엉덩 깊은 근육 이완 방법: 한쪽 다리를 앞에 접고 다른 다리는 뒤로 뻗는다 → 엉덩이를 바닥쪽으로 내리며 늘어나는 느낌 유지(1분).
 5. 엉덩관절 안쪽·바깥쪽 돌림	목적: 엉덩관절 가동성 향상 방법: 다리를 벌리고 앉는다 → 골반을 세운 상태에서 무릎을 안쪽→바깥쪽으로 천천히 돌린다 → 각 15회×2세트.



목적: 허벅지 바깥·엉덩정강근막띠 이완
방법: 누워 무릎을 세운다 → 반대 발로 무릎 바깥쪽을 눌러 옆으로 기울인다 → 허벅지 바깥이 늘어나는 느낌으로 1분 유지.

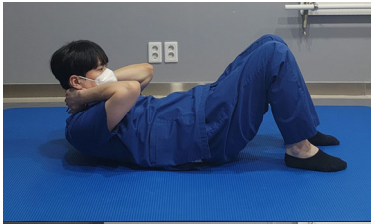
6. 넓다리근막긴장근 스트레칭



7. 런지 + 넓다리곧은근 스트레칭



8. 런지 + 뒤넓다리근 스트레칭

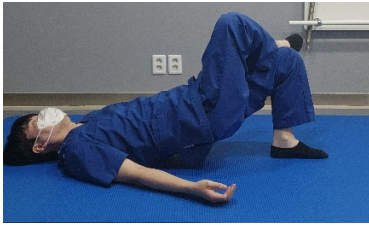


9. 상·하복부 운동



10. 한다리로 엉덩이 들기

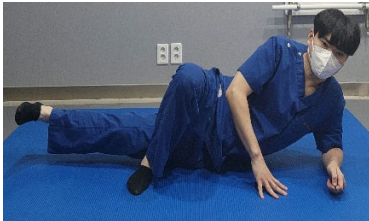
목적: 엉덩이·뒤넓다리근 강화, 골반 안정
방법: 브릿지 자세 → 한쪽 다리는 올리고 지지 다리로 엉덩이를 들어 올린다 → 1초 유지 후 내리기 → 각 15회×2세트.



11. 플랭크(안전 버전)



12. 사이드 플랭크



13. 사이드 모음근 강화



14. 엉덩이 들기 + 엉덩관절 굽힘 운동

15. 스쿼트

목적: 몸통 심부 안정화

방법: 의자에 팔꿈치를 올려 몸을 대각선으로 곧게 만든다 → 배에 힘을 주고 30초~2분 유지.

목적: 옆구리·골반 안정

방법: 옆으로 누워 팔꿈치로 지지 → 몸을 들어 올려 일직선 유지 → 1분 유지(양쪽).

목적: 허벅지 안쪽 강화

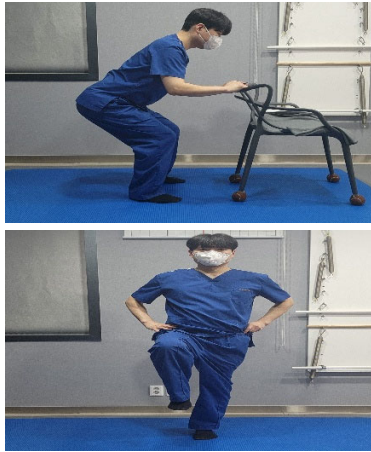
방법: 옆으로 누워 아래쪽 다리를 들어 올린다 → 안쪽 허벅지에 힘 주기 → 각 15회×2세트.

목적: 엉덩이·허벅지 협응 강화

방법: 브리지 자세로 엉덩이를 든 상태에서 한쪽 다리를 들어 올린다 → 15회×2세트.

목적: 엉덩이·허벅지 강화

방법: 발 어깨너비, 의자 잡고 → 엉덩이를 뒤로 빼듯이 앉았다 일어서기 → 15회×2세트.



목적: 균형·엉덩관절 안정

방법: 서서 한쪽 다리를 천천히 들어올려 90도 굽힘 → 좌우 흔들림 없이
15회×2세트.

16. 제자리에서 한다리 들기

3. 측정도구

1) 보행 분석

보행의 효율성과 균형을 정량적으로 평가하기 위해 발바닥 압력 기반 보행 분석 시스템(Gait Checker, GHW-1100, GHWell, Korea)을 사용하였다. 본 장비는 발바닥의 압력 분포를 통해 보폭, 보행 속도 등의 주요 시공간 변수를 산출한다(Di Biase 등, 2020). 측정 전 대상자는 보행 매트 전방에서 출발하여 자연스러운 속도(self-selected pace)로 걷도록 하였다. 각 대상자는 동일한 조건에서 3회 반복 측정을 수행하였으며, 세 번의 측정값 평균을 최종 분석에 사용하였다(Yan 등, 2022). 본 연구에서는 전체 지지기, 한다리 지지기(single limb support), 보장(step length)을 핵심 분석 지표로 설정하였다. 한다리 지지기는 보행 주기 중 오직 한쪽 발만이 지면에 접촉해 있는 구간으로 정의하였다(Di Biase 등, 2020).

2) 다리 관절각 분석

보행 중 다리의 운동학적 변화를 분석하기 위해 스마트폰 카메라를 사용하여 대상자의 우측면 영상을 촬영하였다. 해부학적 표식점인 넓다리뼈 큰돌기(greater trochanter), 무릎 가쪽위관절융기(lateral epicondyle), 가쪽복사(lateral malleolus), 다섯째 중족골두(5th metatarsal head)에 반사 마커를 부착하는 Davis 프로토콜을 따랐다(Moro 등, 2022). 촬영된 영상을 이용하여 보행 주기 중 유각기(swing phase)에서 엉덩관절, 무릎관절, 발목관절의 최대 굽힘각을 측정하였고, 3회 반복 측정하여 평균값을 사용하였다(Yan 등, 2022). 비디오 기반의 보행 분석은 3D 적외선 모션캡처 시스템과 비교하여 시공간 파라미터 및 관절 각도 측정에서 통계적으로 유사한 결과를 보였다는 선행 연구에 근거하여 타당한 방법으로 간주하였다(Moro 등, 2022).

3) 다리 근활성도 분석

보행 시 다리 근육의 근활성도는 8채널 무선 표면근전도기(TeleMyo DTS, Noraxon Inc., USA)를 이용하여 측정하였다(Conner 등, 2022). 측정 근육은 넓다리곧은근(RF), 앞정강근(TA), 장딴지근(GCM), 가자미근(Soleus, SOL), 넓다리두갈래근(BF), 오금근(Popliteus, POP)으로 설정하였으며, 전극 부착 위치는 SENIAM(Surface

ElectroMyoGraphy for the Non-Invasive Assessment of Muscles) 가이드라인에 따라 표준 절차를 따랐다(Hermens 등, 2000). 근전도 신호는 20-450 Hz 대역통과 필터와 50 ms 이동평균(Root Mean Square, RMS)을 사용하여 평활화하였다(Korak 등, 2020; da Silva Junior 등, 2023). 각 근육의 활성도는 최대 수의적 등척성 수축(MVIC) 대비 백분율(%MVIC)로 정규화하였으며, MVIC은 표준화된 자세에서 3회 반복 측정하여 그중 최대 값을 기준으로 사용하였다(Luk 등, 2021). 보행 중 근활성도와 영상 간 동기화를 통해 뒤꿈치 닿기(heel strike)와 발끝 떼기(toe-off) 이벤트를 구분하고, 지지기 구간의 평균 %MVIC을 분석에 사용하였다(Agostini 등, 2020).

4) 통증 및 기능장애 평가

통증 강도는 시각적 유사척도(Visual Analogue Scale, VAS)를 이용하여 평가하였다. VAS는 10 cm 길이의 수평선 양 끝에 '통증 없음'과 '상상할 수 없을 정도로 심한 통증'을 제시하고, 대상자가 현재 통증 수준을 표시하도록 하여 점수화하였다(Yoon 등, 2013). 기능적 장애 수준은 한국판 오스웨스트리 장애지수(K-ODI)를 사용하여 평가하였다. K-ODI는 통증 강도, 개인 위생, 물건 들기, 걷기, 앉기, 서기, 수면, 성생활, 사회 생활, 여행 등 10개 항목으로 구성되며, 각 항목을 0점에서 5점까지 평가한다(Jeon 등, 2006). 총점을 백분율로 환산하여 점수가 높을수록 기능 제한 정도가 큼을 의미한다. 국내 연구에서 K-ODI는 높은 내적 일관성(Cronbach's $\alpha = 0.92$)과 검사-재검사 신뢰도($r = 0.93$)를 보여 신뢰도와 타당성이 입증되었다(Jeon 등, 2006). 본 연구에서는 사전·사후 K-ODI 점수를 비교하여 기능적 장애의 변화를 확인하였다.

4. 자료분석

모든 통계 분석은 SPSS Statistics 26.0(IBM Corp., USA)을 사용하여 수행하였다. 종속변수는 보행 변수(보폭[stride length], 보간[stride width], 지지기[stance phase], 한 다리 지지기[single-limb stance]), 다리 관절각(엉덩관절[hip], 무릎관절[knee], 발목관절[ankle]), 근활성도(%MVIC: 넙다리곧은근[RF], 앞정강근[TA], 넙다리두갈래근[BF], 가자미근[SOL], 오금근[POP], 장딴지근[GCM]), 통증(VAS), 기능장애지수(K-ODI)였다. 정규성 검정은 Shapiro-Wilk 검정을 통해 확인하였으며, 모든 변수는 정규분포를 나타냈다($p > .05$). 중재 전·후 변화 분석을 위해 대응표본 t-검정(paired t-test)을 실시하였다. 또한, 보행 효율 향상에 영향을 미치는 요인을 규명하기 위해 보폭 변화량(사후-사전)을 종속변수로 하고, VAS, K-ODI, stance phase, single-limb stance, 다리 관절각 변화량(hip, knee, ankle), 다리 근활성도 변화량(RF, TA, BF, SOL, POP, GCM)을 독립변수로 한 다중회귀분석(multiple regression analysis)을 실시하였다. 모든 통계적 유의수준은 $p < .05$ 로 설정하였다.

III. 연구결과

1. 일반적 특성

최종 분석에 포함된 대상자는 총 27명이었으며, 이 중 남성 17명, 여성 10명으로 구성되었다. 대상자의 평균 연령은 26.24 ± 3.93 세, 평균 체중은 74.71 ± 2.41 kg, 평균 신장은 169.90 ± 7.74 cm로 나타났다. 기능적 장애 수준을 나타내는 K-ODI 평균 점수는 29.4 ± 5.6 점으로, 전반적으로 경도에서 중등도에 해당하는 기능적 장애 수준을 보였다(Table 2).

Table 2. Participant characteristics ($n=27$)

Variable	Mean $\pm$ SD
Age (years)	24.7 $\pm$ 2.6 ^a
Height (cm)	169.2 $\pm$ 7.5
Weight (kg)	64.8 $\pm$ 9.3
BMI (kg/m ²)	22.5 $\pm$ 2.3
K-ODI (%)	29.4 $\pm$ 5.6
VAS (score)	6.1 $\pm$ 1.2
Gender (Male/Female)	13 / 14

BMI: Body Mass Index, K-ODI: Korean version of the Oswestry Disability Index, VAS: Visual Analog Scale, ^aM $\pm$ SD

2. 다중회귀분석 결과

보행 효율의 지표인 보폭 변화량(사후-사전)에 영향을 미치는 요인을 확인하기 위해 다중선형회귀분석을 실시하였다. 전체 회귀모형은 통계적으로 유의하였으며(Model summary 및 ANOVA 기준), 예측변수들이 보폭(stride length) 변화량을 설명하는 데 적합한 것으로 나타났다. 모형의 상관계수는 $R=0.910$, 설명력은 $R^2=0.829$, 수정 R^2 는 0.629 로 확인되어, 본 연구에서 포함된 변수들이 보폭 변화량의 약 63%를 설명하는 것으로 나타났다($F(14,12)=4.145$, $p=0.009$). 다중공선성 검토 결과, 공차한계(tolerance)는 $0.46\sim0.89$, 분산팽창지수(variance inflation factor, VIF)는 $1.12\sim7.18$ 범위로 모두 허용 가능한 수준이었으며, Durbin-Watson 값은 1.623 으로 잔차의 자기상관 문제도 크지 않았다. 개별 회귀계수 분석 결과, 중재 전 보행 안정성(stride stability)의 기초선(baseline) 값이 보폭 변화량을 가장 강력하게 예측하는 요인으로 나타났다($B=2.07$, $SE=0.47$, $\beta=0.78$, $t=4.42$, $p=0.001$). 이는 중재 전 보행 안정성이 높을수록 TSE 이후 보행 효율 향상이 크게 나타난다는 의미다. 또한 통증 변화량(VAS)도 유의한 예측변수로 확인되었다($B=3.89$, $SE=2.54$, $\beta=0.39$, $t=2.24$, $p=0.014$). 통증 감소가 클수록 보폭 증가폭 역시 커지는 경향을 보여, 통증 조절이 보행 효율 개선과 밀접한 관련이 있음을 시사한다. 앞정강근(TA) 변화량($B=13.22$, $p=0.071$)과 K-ODI 변화량($B=4.69$, $p=0.107$)은 0.10 수준에서 경향성이 있었으나 통계적으로 유의한 예측변수로 보기는 어려웠다. 그 외 다리 관절각 변화량(엉덩·무릎·발목관절), 보행 변수(지지기, 한 다리 지지기), 근활성도(넙다리곧은근, 넙다리두갈래근, 가자미근, 오금근, 장딴지근) 변화량은 유의한 영향을 보이지 않았다(Table 3, 4, 5).

Table 3. Changes in pain and functional measures before and after intervention (unit: score, %)

Variable	Pre	Post	Mean difference	$t(26)$	p
VAS	6.15 $\pm$ 1.21a	3.48 $\pm$ 1.09	-2.67 $\pm$ 1.08	8.46	<0.001*
K-ODI	29.37 $\pm$ 5.58	23.62 $\pm$ 5.01	-5.75 $\pm$ 2.34	7.18	<0.001*

VAS: Visual Analog Scale, K-ODI: Korean version of the Oswestry Disability Index, ^aM $\pm$ SD, * $p<.05$

Table 4. Pre and post intervention changes in lower-limb joint angles and EMG (unit: $^{\circ}$, %MVIC)

Muscle / Joint	Pre	Post	p
Hip flexion angle	23.48 $\pm$ 3.61a	25.37 $\pm$ 3.80	0.032*
Knee flexion angle	47.22 $\pm$ 5.81	47.85 $\pm$ 6.02	0.574
Ankle dorsiflexion angle	11.93 $\pm$ 2.71	12.12 $\pm$ 2.54	0.627
Rectus femoris	43.2 $\pm$ 7.5	46.9 $\pm$ 8.2	0.068
Tibialis anterior	38.5 $\pm$ 6.8	41.7 $\pm$ 7.2	0.071
Biceps femoris	35.4 $\pm$ 6.3	37.1 $\pm$ 5.9	0.158
Soleus	40.7 $\pm$ 7.6	43.2 $\pm$ 8.1	0.112
Gastrocnemius	41.8 $\pm$ 8.5	43.0 $\pm$ 8.8	0.236
Popliteus	34.1 $\pm$ 6.9	35.5 $\pm$ 7.1	0.229

^aM $\pm$ SD, * $p<.05$

Table 5. Multiple regression analysis predicting stride length improvement

Predictor variable	<i>B</i>	<i>SE</i>	β	<i>t</i>	<i>p</i>
Baseline stride stability	2.07	0.47	0.78	4.42	0.001*
VAS	3.89	2.54	0.39	2.24	0.014*
K-ODI	1.12	1.07	0.18	1.04	0.317
Tibialis anterior	13.21	6.99	0.29	1.89	0.071
Constant	-5.13	2.34	—	-2.19	0.045*

VAS: Visual Analog Scale, K-ODI: Korean version of the Oswestry Disability Index, ^aM±SD, **p*<.05

IV. 고 찰

본 연구는 4주간의 몸통 안정화 운동이 만성 요통 대상자의 보행 효율에 미치는 영향을 분석하고, 보폭 변화의 예측요인을 규명하기 위해 다중회귀분석을 시행하였다. 그 결과, 보폭 변화는 중재 전 보행 안정성과 통증 변화량에 의해 유의하게 설명되는 것으로 나타났으며, 전체 모형의 설명력은 62.9%(Adj. $R^2 = .629$)로 확인되었다. 이는 몸통 안정화 운동이 보행 효율을 향상시키는 과정에서 단일 기전이 아닌 통증 완화와 기저 보행 안정성이라는 두 요소가 중요한 역할을 한다는 점을 시사한다.

우선, 중재 전 보행 안정성이 보폭 변화의 가장 강력한 예측변수로 나타난 점은, 개인이 가진 초기 신경근 안정성(neuromuscular stability)이 몸통 안정화 운동의 반응성을 결정하는 주요 요인임을 의미한다. 보행 안정성이 높다는 것은 걷기 동안 일정한 리듬과 대칭성을 유지할 수 있다는 뜻이며, 이러한 기본적인 안정성이 확보된 상태에서는 몸통 및 하지 근육의 협응 회복이 더 빠르게 나타난다. 본 연구에서 중재 전 보행 안정성이 높을수록 보폭 증가폭이 컸다는 점은, 단순한 평균 회귀(regression to the mean)가 아니라 초기 능력이 우수할수록 중재 반응이 크게 나타나는 'high responder' 특성과 연관될 수 있다(Sung, 2019). 따라서 재활 초기 단계에서 보행 안정성을 정량적으로 평가하는 것은 치료 반응을 예측하고 맞춤형 운동 강도를 설정하는 데 유용한 임상 정보를 제공한다.

통증 강도가 보행 속도 및 보폭과 유의한 음의 상관관계를 보인다는 결과는 통증 감소가 보행 개선의 중요한 예측요인임을 시사하며, 이는 통증이 운동 조절 전략을 변화시킨다는 신경생리학적 설명과 일치한다(Bonab 등, 2020; Hodges와 Tucker, 2011). 통증은 척수 및 피질 수준에서 보호적 억제(protective inhibition) 또는 운동 적응(motor adaptation)을 유발하여 근수축의 효율을 저하시키고 보행 패턴을 변화시킨다(Gilligan 등, 2025; Martinez-Valdes 등, 2020). 반면 통증이 완화되면 신경근 조절 능력이 정상화되어 보행의 추진력과 대칭성이 회복될 수 있다. 본 연구에서 통증 감소가 클수록 보폭 증가가 크게 나타난 결과는, 몸통 안정화 운동이 통증 완화, 심부 근육의 운동 조절 회복, 그리고 보행 효율 증진이라는 단계적 기전을 통해 효과를 나타낸다는 점을 뒷받침한다(Wang 등, 2023; Mohammadi 등, 2023).

근활성도 변화의 경우, 넙다리곧은근(RF)과 앞정강근(TA)은 유의하지는 않았지만 회복 경향성($p \approx .07$)을 보였다. 문헌에 따르면 보행 추진력은 주로 장딴지근(GCM)과 가자미근(SOL)에 의해 생성되므로(Clark 등, 2021; Pimentel 등, 2023), 넙다리곧은근(RF)과 앞정강근(TA)의 변화가 보폭 향상을 직접적으로 설명한다고 단정하기는 어렵다. 오히려 넙다리곧은근(RF)의 과도한 활성화는 보행 제동(braking)에 기여하거나 유각기 무릎 굴곡을 제한할 수 있어(Brough 등, 2022), 이들의 활성 변화는 추진력 생성보다는 하지의 전반적인 협응 및 부하 분산 전략의 변화로 해석하는 것이 타당하다(Jafarnejadgero 등, 2022). 특히 앞정강근(TA) 변화에서 관찰된 높은 VIF는 다중공선성의 가능성을 시사하므로 해석에 주의가 필요하다. 다만 이러한 경향성은 통증 감소와 운동 제어 변화가 부분적으로 연계될 가능성을 보여주며, 향후 연구에서는 통증이 보행 수행에 미치는 영향을 구체화하기 위해 매개분석(mediation analysis)을 통한

간접 경로 규명이 필요하다(Ogawa 등, 2021).

K-ODI 변화는 보폭을 직접적으로 예측하지는 않았는데, 이는 본 연구 참여자의 기능장애 수준이 중등도 범위(21-40%)에 집중되어 있어 척도의 변별력이 비교적 낮았기 때문으로 해석된다. 그럼에도 기능 개선이 관찰된 대상자 일부에서 균형능력이나 보행 안정성이 부분적으로 향상된 점은, 기능 회복이 보행 효율 증가에 간접적으로 기여할 수 있는 가능성을 보여준다.

하지 관절각 측면에서 엉덩관절 굽힘각만 유의하게 증가하고 무릎 및 발목 각도에는 변화가 없었던 결과는, 몸통 중심의 중재가 하지 원위부의 운동학적 변화 없이도 보폭과 같은 시공간적 보행 변수를 개선할 수 있음을 보고한 선행 연구와 일치한다(Van Criekinge 등, 2020). 이는 본 운동 프로그램이 다리 먼쪽(distal segment)보다는 허리뼈-골반 복합체(lumbopelvic complex)의 몸쪽 안정화에 중점을 두었음을 반영한다(Akuthota와 Nadler, 2004; Mohammadi 등, 2023). 따라서 본 연구에서 나타난 보폭의 증가는 관절의 기계적 변화보다는 통증 감소 및 신경근 안정화 회복에 더 직접적으로 기인한 결과로 해석된다(Toktas 등, 2023; Hlaing 등, 2021).

종합하면, 본 연구의 회귀모델은 보폭 변화의 약 63%를 설명하였으며, 이는 몸통 안정화 운동이 통증 완화와 기저 보행 안정성을 중심으로 보행 효율 향상에 작용하는 복합적 신경근학적 기전을 갖는다는 점을 보여준다. 임상적으로는 (1) 몸통 안정화 운동이 젊은 성인 만성 요통 대상자에게 단기(4주)에도 효과적이라는 점, (2) 중재 전 보행 안정성 평가를 통해 개인별 치료 반응을 예측할 수 있다는 점, (3) 통증 조절 전략이 보행 효율 회복의 핵심 요소라는 점에서 중요한 의미를 가진다.

본 연구의 한계로는 표본 수가 적고 젊은 성인으로 국한되어 결과의 일반화가 제한된다는 점, 2D 기반 관절각 측정의 정밀도 한계, 장기 추적 평가의 부재 등을 들 수 있다. 향후 연구에서는 다양한 연령과 통증 단계(급성·아급성·만성)를 포함한 무작위 대조시험 및 구조방정식모형을 활용하여 몸통 안정화 중재가 통증, 근활성도, 보행 효율에 미치는 인과적 경로를 보다 명확히 규명할 필요가 있다.

V. 결 론

본 연구는 4주간의 몸통 안정화 운동이 만성 허리 통증 대상자의 보행 효율 향상에 긍정적인 영향을 미친다는 점을 확인하였다. 중재 후 통증이 유의하게 감소하였고, 이러한 통증 완화는 보폭 증가를 예측하는 중요한 요인으로 나타났다. 또한 중재 전 보행 안정성이 높을수록 보행 효율 향상이 크게 나타나, 초기 평가가 치료 반응을 예측하는 핵심 기준이 될 수 있음을 보여주었다. 이러한 결과는 몸통 안정화 운동이 젊은 성인 만성 허리 통증 대상자에서 통증 완화와 보행 기능 회복을 동시에 달성할 수 있는 근거 기반 재활 전략임을 시사한다.

참고문헌

- Agostini V, Ghislieri M, Rosati S, et al. Surface electromyography applied to gait analysis: how to improve its impact in clinics? *Front Neurol.* 2020;11:994. <https://doi.org/10.3389/fneur.2020.00994>
- Ahn SE, Lee MY, Lee BH. Effects of gluteal muscle strengthening exercise-based core stabilization training on pain and quality of life in patients with chronic low back pain. *Medicina.* 2024;60(6):849. <https://doi.org/10.3390/medicina60060849>
- Akhtar MW, Karimi H, Gilani SA. Effectiveness of core stabilization exercises and routine exercise ther-

- apy in management of pain in chronic nonspecific low back pain: A randomized controlled clinical trial. *Pak J Med Sci.* 2017;33(4):1002-1006. <https://doi.org/10.12669/pjms.334.12664>
- Akuthota V, Nadler SF. Core strengthening. *Arch Phys Med Rehabil.* 2004;85(3 Suppl 1):S86-S92. <https://doi.org/10.1053/j.apmr.2003.12.005>
- Alavi Mehr SM, Mousavi SH, Jafarnezhadgero AA. The effect of a selected exercise protocol on trunk and lower limb muscle activity of older adults with both low back pain and pronated feet during walking. *Sport Sci Health Res.* 2022;14(1):129-140. <https://doi.org/10.22059/sshr.2022.333835.1070>
- Alshehri MM, Alhowimel AS, Alqarni AM, et al. Prevalence of lower back pain and its associations with lifestyle behaviors among college students in Saudi Arabia. *BMC Musculoskelet Disord.* 2023;24:646. <https://doi.org/10.1186/s12891-023-06764-x>
- Bonab MAR, Akbari H, Piry H. Assessment of spatiotemporal gait parameters in patients with lumbar disc herniation and patients with chronic mechanical low back pain. *Turk Neurosurg.* 2020;30(2):224-230. <https://doi.org/10.5137/1019-5149.JTN.25807-19.1>
- Bonab MAR, Colak TK, Toktas ZO, et al. Spatiotemporal gait parameters and gait asymmetry in patients with lumbar disc herniation, treated with microdiscectomy: A prospective, observational study. *Neurospine.* 2023;20(3):947-958. <https://doi.org/10.14245/ns.2346614.307>
- Brough LG, Kautz SA, Neptune RR. Muscle contributions to pre-swing biomechanical tasks influence swing leg mechanics in individuals post-stroke during walking. *J Neuroeng Rehabil.* 2022;19:55. <https://doi.org/10.1186/s12984-022-01033-x>
- Christe G, Aussems C, Jolles BM, et al. Patients with chronic low back pain have an individual movement signature: A comparison of angular amplitude, angular velocity and muscle activity across multiple functional tasks. *Front Bioeng Biotechnol.* 2021;9:767974. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.767974>
- Clark WH, Pimentel RE, Franz JR. Imaging and simulation of inter-muscular differences in triceps surae contributions to forward propulsion during walking. *Ann Biomed Eng.* 2021;49(2):703-715. <https://doi.org/10.1007/s10439-020-02598-9>
- Conner BC, Remick M, Kleiner J, et al. Programmable plantar pressure-based audiovisual biofeedback for targeted gait retraining in cerebral palsy. *J Neuroeng Rehabil.* 2022;19:135. <https://doi.org/10.1186/s12984-022-01103-0>
- da Silva Junior EFF, Campos SL, Leite WS, et al. Surface electromyography signal processing and evaluation on respiratory muscles of critically ill patients: A systematic review. *PLoS ONE.* 2023;18(4):e0284911. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0284911>
- Di Biase L, Di Santo A, Caminiti ML, et al. Gait analysis in Parkinson's disease: An overview of the most accurate markers for diagnosis and symptoms monitoring. *Sensors.* 2020;20(12):3529. <https://doi.org/10.3390/s20123529>
- Ge L, Wang C, Zhou H, et al. Effects of low back pain on balance performance in elderly people: a systematic review and meta-analysis. *Eur Rev Aging Phys Act.* 2021;18:8. <https://doi.org/10.1007/s00038-021-01588-8>

i.org/10.1186/s11556-021-00262-w

- Ghamkhar L, Kahlaee AH. A comparison of the spatio-temporal parameters during gait in subjects with and without chronic low back pain: A systematic review. *Int J Clin Skills*. 2021;10(8):432-441.
- Gilligan CJ, Volschenk W, Russo M, et al. Restorative neurostimulation for chronic mechanical low back pain: results from a prospective multi-center longitudinal study. *Neuromodulation*. 2021;24(8):1273-1283. <https://doi.org/10.1111/ner.13508>
- Gorji SM, Mohammadi M, et al. Pain neuroscience education and motor control exercises versus core stability exercises on pain, disability, and balance in women with chronic low back pain. *Int J Environ Res Public Health*. 2022;19:2694. <https://doi.org/10.3390/ijerph19052694>
- Hartvigsen J, Hancock MJ, Kongsted A, et al. What low back pain is and why we need to pay attention. *Lancet*. 2018;391(10137):2356-2367. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)30480-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)30480-X)
- Hermens HJ, Freriks B, Disselhorst-Klug C, et al. Development of recommendations for SEMG sensors and sensor placement procedures. *J Electromyogr Kinesiol*. 2000;10:361-374. [https://doi.org/10.1016/S1050-6411\(00\)00027-4](https://doi.org/10.1016/S1050-6411(00)00027-4)
- Hodges PW, Tucker K. Moving differently in pain: a new theory to explain the adaptation to pain. *Pain*. 2011;152(3 Suppl):S90-S98. <https://doi.org/10.1016/j.pain.2010.10.030>
- Ilic MD, Zivanovic Macuzic I, Kocic S, et al. Low back pain among medical students: prevalence and risk factors. *PeerJ*. 2021;9:e11055. <https://doi.org/10.7717/peerj.11055>
- In TS, Jung JH, Jung KS, et al. Effects of the multidimensional treatment on pain, disability, and sitting posture in patients with low back pain: A randomized controlled trial. *Pain Res Manag*. 2021;2021:5581491. <https://doi.org/10.1155/2021/5581491>
- Jafarnezhadgero AA, Hamlabadi MP, Sajedi H, et al. Recreational runners who recovered from COVID-19 show different running kinetics and muscle activities compared with healthy controls. *Gait Posture*. 2022;91:260-265. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.10.027>
- Jeon CH, Kim DJ, Kim SK, et al. Validation in the cross-cultural adaptation of the Korean version of the Oswestry Disability Index. *J Korean Med Sci*. 2006;21:1092-1097. <https://doi.org/10.3346/jkms.2006.21.6.1092>
- Jeong S, Kim SH, Park KN. Is lumbopelvic motor control associated with dynamic stability during gait, strength, and endurance of core musculatures? The STROBE study. *Medicine*. 2022;101(46):e31025. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000031025>
- Kim B, Yim J. Core stability and hip exercises improve physical function and activity in patients with non-specific low back pain: A randomized controlled trial. *Tohoku J Exp Med*. 2020;251(3):193-206. <https://doi.org/10.1620/tjem.251.193>
- Korak JA, Paquette MR, Fuller DK, et al. The influence of normalization technique on between-muscle activation during a back-squat. *Int J Exerc Sci*. 2020;13(1):1098-1107. PMID: 32922646
- Lee JY, Jeon J, Lee DY, et al. Effect of trunk stabilization exercise on abdominal muscle thickness, balance and gait abilities of patients with hemiplegic stroke: A randomized controlled trial. *NeuroRehabilitation*. 2020;47:435-442. <https://doi.org/10.3233/NRE-203204>
-

- Luk JTC, Kwok FKC, Ho IMK, et al. Acute responses of core muscle activity during bridge exercises on the floor vs. the suspension system. *Int J Environ Res Public Health*. 2021;18:5908. <https://doi.org/10.3390/ijerph18115908>
- Martinez-Valdes E, Negro F, Farina D, et al. Divergent response of low- versus high-threshold motor units to experimental muscle pain. *J Physiol*. 2020;598(11):2093-2108. <https://doi.org/10.1113/JP279227>
- Mohammadi V, Letafatkar A, Jafarnezhadgero AA. Effects of core stability training on kinematic and kinetics of trunk flexion and extension in patients with chronic non-specific low back pain. *Phys Treat*. 2023;13(1):55-66. <https://doi.org/10.32598/ptj.13.1.536.1>
- Moro M, Marchesi G, Hesse F, et al. Markerless vs. marker-based gait analysis: A proof of concept study. *Sensors*. 2022;22(5):2011. <https://doi.org/10.3390/s22052011>
- Nishi Y, Shigetoh H, Fujii R, et al. Changes in trunk variability and stability of gait in patients with chronic low back pain: Impact of laboratory versus daily-living environments. *J Pain Res*. 2021;14:1675-1686. <https://doi.org/10.2147/JPR.S306780>
- Ogawa EF, Shi L, Bean JF, et al. Chronic pain characteristics and gait in older adults: The MOBILIZE Boston Study II. *Arch Phys Med Rehabil*. 2021;102(3):452-460. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2020.09.390>
- Pimentel RE, Sawicki GS, Franz JR. Simulations suggest walking with reduced propulsive force would not mitigate the energetic consequences of lower tendon stiffness. *PLoS ONE*. 2023;18(10):e0293331. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0293331>
- Rožac K, Mikšić Š. Sedentary lifestyle and back pain. *Coll Antropol*. 2021;45(2):135-140. <https://doi.org/10.5671/ca.45.2.6>
- Saito H, Yokoyama H, Sasaki A, et al. Variability of trunk muscle synergies underlying the multidirectional movements and stability trunk motor tasks in healthy individuals. *Sci Rep*. 2023;13:2066. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29177-3>
- Saygılı F, Kara G, Baskan E. Investigation of the effect of bridge exercises performed at different knee angles on muscle strength and endurance in healthy persons: Randomized controlled trial. *Izmir Katip Celebi Univ Saglik Bilim Fak Derg*. 2023;8(3):575-582. <https://doi.org/10.61399/ikcesbfd.1368940>
- Smith JA, Stabbert H, Bagwell JJ, et al. Do people with low back pain walk differently? A systematic review and meta-analysis. *J Sport Health Sci*. 2022;11(4):450-465. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2022.01.002>
- Wang H, Fan Z, Liu X, et al. Effect of progressive postural control exercise versus core stability exercise in young adults with chronic low back pain: A randomized controlled trial. *Pain Ther*. 2023;12(1):293-308. <https://doi.org/10.1007/s40122-022-00461-1>
- Wang W, Wei H, Shi R, et al. Dysfunctional muscle activities and co-contraction in the lower-limb of lumbar disc herniation patients during walking. *Sci Rep*. 2020;10:20432. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77443-4>

- Wernli K, O'Sullivan P, Smith A, et al. Movement, posture and low back pain. How do they relate? A replicated single-case design in 12 people with persistent, disabling low back pain. *Eur J Pain*. 2020;24(9):1831-1849. <https://doi.org/10.1002/ejp.1627>
- Xu H, Sekiguchi Y, Izumi S-I. Gait kinematics and muscle activation patterns in people with symptom remission from recurrent low back pain: a cross-sectional study. *BMC Musculoskelet Disord*. 2021;22:349. <https://doi.org/10.1186/s12891-021-04223-z>
- Yan Z-W, Yang Z, Yang J, et al. Tai Chi for spatiotemporal gait features and dynamic balancing capacity in elderly female patients with non-specific low back pain: A six-week randomized controlled trial. *J Back Musculoskelet Rehabil*. 2022;35(6):1343-1351. <https://doi.org/10.3233/BMR-210190>
- Yang NY, Park HY, Kim JS, et al. A pilot study on the validity and reliability of the Korean version of the Oswestry Disability Index in a farming community. *Korean J Occup Environ Med*. 2010;22(4):290-297. <https://doi.org/10.35371/kjoem.2010.22.4.290>
- Yoon J, Choi KH, Kim TW, et al. Reliability and validity of the Korean version of the Pain Disability Questionnaire. *Ann Rehabil Med*. 2013;37(6):814-823. <https://doi.org/10.5535/arm.2013.37.6.814>
- Zileli A, Cankaya T. Assessment of posture, spinal mobility and EMG data in patients with spinal stenosis. *Balt J Health Phys Act*. 2022;14(4):Article2. <https://doi.org/10.29359/BJHPA.14.4.02>
-