Check for updates
Journal of the Korean Society of Costume
Vol. 75, No. 5 (October 2025) pp. 199-214
Print ISSN 1229-6880
Online ISSN 2287-7827
https://doi.org/10.7233/jksc.2025.75.5.199

밀착바지 착용이 발달장애 성인 남성의 평지보행 시 관절각에 미치는 영향

- IMU 센서를 활용한 운동학적 분석 -

김 남 임·이 효 정+
국립공주대학교 의류상품학과 박사후연구원·국립공주대학교 의류상품학과 부교수+

Effects of Compression Pants on Joint Angles during Level Walking in Adult Males with Developmental Disabilities

- A Kinematic Analysis Using IMU Sensors -

Nam Yim Kim·Hyojeong Lee+
Postdoctoral Fellowship, Dept. of Fashion Design & Merchandising, Kongju National University
Associate Professor, Dept. of Fashion Design & Merchandising, Kongju National University
(received date: 2025. 9. 23, revised date: 2025. 10. 27, accepted date: 2025. 10. 28)

ABSTRACT

Individuals with developmental disabilities often present with excessive pelvic compensation, reduced propulsion at the hip and knee, and excessive ankle rotation, leading to diminished gait stability and efficiency. This study evaluated the effects of different compression strengths of tight-fitting pants on lower limb joint kinematics in young males with mild developmental disabilities. On the basis of the results, recommendations on optimal clothing pressure were formulated to enhance gait stability. Twelve male participants in their 20s were instructed to wear pants with low and high compression as well as trousers with loose fit (controls). IMU sensors were attached to the pelvis, hip, knee, and ankle of the subjects to capture kinematic data over a 15-minute session of treadmill walking. The results indicated that pelvic tilt significantly decreased with compression pants compared with the control clothing, pointing to attenuated anterior-posterior oscillation. Maximum internal rotation and rotational range of motion at the hip declined, suggesting improved control of excessive motion. At the knee, high compression increased flexion and slightly reduced extension, implying a potential reduction in forward propulsion. At the ankle, high compression significantly decreased eversion and external rotation, thus improving lateral stability. On the basis of these outcomes, the recommended clothing pressure levels for individuals with mild developmental disability are as follows: pelvis = 0.8 to 1.0 kPa, thigh = 1.35 to 1.50 kPa, knee = 1.55 to 1.75 kPa, ankle = 0.90 kPa, and calf 1.8 to 2.1 kPa. The findings serve as fundamental guidelines for the development of customized compression garments that suit the gait characteristics of individuals with developmental disabilities. This study also highlights the potential of compression clothing to enhance gait stability and efficiency, offering valuable implications for functional apparel design aimed at fall prevention and improved mobility among the population of interest.

본 연구는 한국과학기술부의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구결과의 일부임 (No. RS-2023-00211608)
Corresponding author: Hyojeong Lee, e-mail: hyojeong@kongju.ac.kr

Key words: clothing pressure(의복압), compression pants(밀착바지), gait analysis(보행분석), lower limb joint angles(하지 관절각), mild developmental disability(발달 장애인)

I. 서론

보행은 인간의 기본적인 이동 활동이자, 독립적인 일상생활을 영위하기 위한 필수적 기능이다. 정상 성인의 보행은 골반, 고관절, 슬관절, 족관절이 유기적으로 협응하여 안정성과 추진력을 확보하는 복합적 운동이다.

그러나 발달장애인은 균형 조절 능력, 관절 운동 범위(range of motion; ROM), 근육 협응 능력 등에 제한이 있어 비정상적인 보행 패턴을 보이는 경우가 많다(Wilmut et al., 2016). 특히 발달장애인은 기본적인 보행 수행은 가능하지만, 골반의 과도한 전방경사(anterior pelvic tilt), 고관절 회전 제한, 슬관절 신전 부족, 족관절의 과도한 내·외번 등의 특성을 보인다. 이러한 특성은 보행 안정성을 저하시켜 낙상 위험을 높이고, 장기적으로는 운동 효율을 감소시키는 요인이 된다(Naruse et al., 2017). 이와 같은 문제는 단순히 이동 능력의 저하에 그치지 않고, 사회적 참여와 일상생활 수행의 제약으로 이어지기 때문에 그 중요성이 크다.

최근에는 발달장애인의 보행 특성을 비장애인과 비교하여 규명하려는 연구가 활발히 이루어지고 있다. Haynes et al.(2012)는 지적장애인이 비장애인보다 보폭과 보장 거리가 짧은 경향을 보였으며, 이를 균형 능력 저하를 보완하기 위한 보상적 전략으로 해석하였다. Accardo and Whitman (1989)은 지적장애인의 첨족 보행(toe walking)을 비정상적인 균형 발달의 지연 결과로 설명하였다. 또한 Jin(2022)은 경증 발달장애인의 보행을 3차원 운동학적으로 분석한 결과, 엉덩관절의 과도한 안쪽돌림, 발목관절의 과도한 내번, 발바닥 굽힘 부족 등의 특성을 보고하였다. 이는 근력 약화와 관절 불안정성에서 기인한 결과로, 발달장애인의 보행이 신체적 제한과 신경근 조절의 불균형으로 인해 비효율적인 양상을 보임을 시사한다.

한편, 보행 중 하지 관절의 동적 거동과 밀착 의복(compression garment)의 상호작용을 정량적으로 규명하려는 연구도 진행되고 있다. Miyashita et al.(2021)은 기능성 생체역학 의류(Functional Biomechanics Garment, FBG)가 보행 중 고관절의 동적 관절 강성(Dynamic Joint Stiffness, DJS)을 감소시켜 관절 움직임을 보다 부드럽게 제어한다고 보고하였다. Chung and Shin(2020)은 허리부터 무릎 위까지의 밀착 바지를 착용하고 보행 시, 비압박 의류에 비해 저압박 조건에서는 보행 주기 시간이 증가하고, 트레드밀 환경에서는 역동성이 향상될 가능성을 제시하였다. 또한 Zhang and Liu(2022)는 압박성 팬츠 착용이 무릎 관절의 움직임 범위(Amplitude of Knee Joint, AKJ)와 보행 주기(gait cycle)를 감소시킨다고 보고하였다.

최근에는 의복압 수준을 세밀하게 조절한 밀착 의류의 효과를 검증하려는 시도도 이루어지고 있다. Kim(2024)은 의복압 수준이 서로 다른 레깅스를 직접 개발하여 보행 효과를 분석하였다. 동일한 패턴 축소율을 적용한 실험복(FCL, 0.43-1.43 kPa)과 부위별로 차등 축소율을 적용한 실험복(GCL, 0.85-2.14 kPa)을 비교한 결과, GCL 착용 시 고관절의 외회전각과 관절 가동범위(ROM)가 감소하여 보다 정상적인 보행 양상으로 조정되는 효과가 나타났다. 이러한 결과는 인체 부위별 의복압 수준에 따라 보행의 역학적 특성이 다르게 나타날 수 있음을 시사한다.

이상의 선행연구들은 밀착 의복이 단순한 피복을 넘어, 하지의 운동역학적 제어 및 보행 효율성 향상에 기여할 수 있음을 보여준다. 그러나 대부분의 연구는 정상인이나 특정 운동선수 집단, 또는 신경학적 손상이 심한 환자를 대상으로 수행되

었으며, 경증 발달장애인을 대상으로 한 연구는 매우 제한적이다. 경증 발달장애인은 기본적인 보행 수행이 가능하지만, 골반의 보상 움직임, 족관절의 과도한 회전, 슬관절의 불완전한 신전 등으로 인해 균형 능력과 추진력이 저하되는 특징을 보인다. 따라서 발달장애인의 보행 특성에 적합한 압박 수준을 설정하고, 관절별 압박이 보행 안정성과 이동성에 미치는 영향을 정량적으로 검증하는 연구가 요구된다.

이에 본 연구는 경증 발달장애인을 대상으로, 루즈핏(control)과 압박 수준이 서로 다른 두 종류의 밀착 바지(CP-L, CP-H) 착용 조건에서 트레드밀 보행 시 골반, 고관절, 슬관절, 족관절의 관절각 변화를 비교·분석하였다. 이를 통해 압박 수준에 따른 하지 관절의 운동 특성을 파악하고, 밀착 바지의 압력 수준이 보행 안정성에 미치는 영향을 규명하고자 한다. 나아가 연구결과를 바탕으로 발달장애인의 보행 보조를 위한 인체 부위별 적정 의복압을 제안함으로써, 낙상 예방 및 운동 효율 향상에 기여할 수 있는 근거 자료를 마련하고, 맞춤형 보행 보조 의복 개발을 위한 기초 정보를 제공하고자 한다.

II. 연구방법

1. 피험자 선정

본 연구의 피험자는 경증 발달장애 20대 남성 12명으로 구성되었다(키 172.6±2.3cm, 체중 68.5±5.2kg). 참여자 대부분은 장애등급 3~4급의 경증 수준으로, 기본적인 의사소통과 일상생활 수행은 가능하나 학습 및 사회적 적응에 어려움을 보였으며, 단순·반복 작업 중심의 직업 활동에 종사하고 있었다. 실험에 참여하기 전, 사전 모임을 통해 연구의 목적과 절차, 안전상의 유의사항 등을 참여자에게 충분히 설명하였으며, 자발적인 참여 의사를 밝힌 지원자만을 최종 피험자로 선정하였다(IRB No. KNU_IRB_2024-035).

2. 실험복 선정 및 의복압 측정

본 연구에서 사용한 밀착 바지 실험복은 〈Table 1〉에 제시된 바와 같이 서로 다른 브랜드의 스포츠용 컴프레션 바지를 구입해 사용하였다. 두 실험복은 시판 제품으로, 원단의 물성, 설계 치수, 패턴 구조 등이 상이하므로 압력 수준을 정량적으로 규명하기 위해 의복압 측정을 실시하였다. 한편, 컨트롤 의복은 루즈핏 형태로 착용 시 의복압이 거의 발생하지 않기 때문에, 정량적 의복압 분석은 두 종류의 밀착 바지 실험복에 한하여 수행하였다. 의복압 측정은 피험자가 각 실험복을 착용한 상태에서 공기주입식 압력 센서(AMI 3037-2, AMI Techno Co., Ltd., Japan)를 이용하여 실시하였으며, 각 부위에서 1분간 서 있는 정자세에서 측정하였다. 측정 부위는 〈Fig. 1〉과 같이 총 6개 지점으로 설정하였다. 구체적으로 전면 허벅지(P1), 무릎(P2), 발목(P3), 엉덩이(P4), 후면 허벅지(P5), 종아리(P6) 부위에서 의복압을 측정하였다. 측정결과를 바탕으로 두 실험복의 평균 압력 수준을 비교하였으며, 이에 따라 고압력형(Compression Pants-High, CP-H)과 저압력형(Compression Pants-Low, CP-L)으로 분류하여 이후의 보행 실험을 진행하였다.

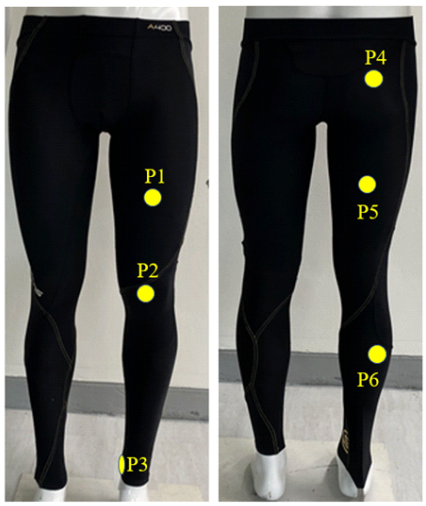
3. 보행 시 관절각 측정

피험자는 루즈핏 컨트롤 의복과 압박 수준이 상이한 두 종류의 밀착 바지(CP-L, CP-H)를 각각 착용한 후 트레드밀에서 평지 보행을 수행하였다. 피험자는 실험실에 입실한 후 충분한 호흡 안정화와 스트레칭을 통해 신체를 이완한 뒤 측정에 참여하였다. 보행 시 관절 움직임을 측정하기 위해 관성측정장치(Inertial Measurement Unit, IMU) 센서(E2BOX, Korea) 를 사용하였다. 센서는 신축성 스트랩을 이용하여 허리, 허벅지, 정강이, 발 부위에 부착하였다〈Fig. 2(a)〉.

보행 실험은 트레드밀 경사각 0°, 속도 3.0

〈Table 1〉 Information on the Experimental Compression Pants.

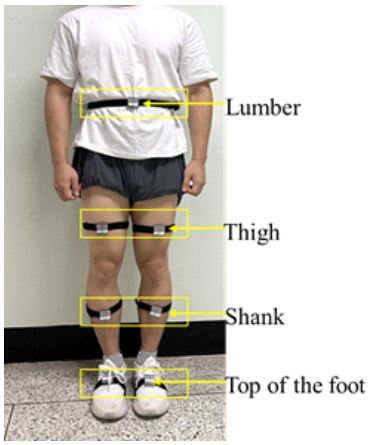
Experimental wears		
	CP-L	CP-H
Image		
Fiber Contents	Recycled polyester 71% Lycra® (elastane) 29%	Polyamide 76% Elastane 24%
Brand	Newbalance New Balance Athletics, Inc.	A400 Symphony Holdings Limited



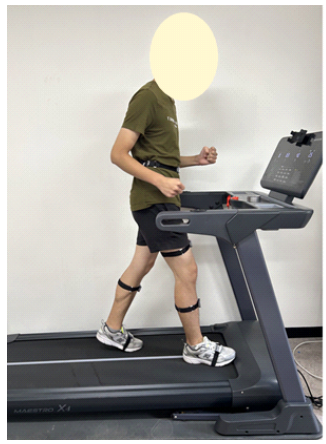
Measuring point	
P1	Anterior thigh
P2	Knee
P3	Medial ankle
P4	Hip
P5	Posterior thigh
P6	Posterior calf

〈Fig. 1〉 Measurement Locations for Clothing Pressure.

km/h의 평지 보행 조건에서 실시하였으며, 각 조건(루즈핏 컨트롤, CP-L, CP-H)에서 15분간 보행을 수행하였다. 관절각 데이터는 보행 중 IMU 센서로부터 전송되는 오일러 각(Euler angle) 정보를 기반으로 수집하였다〈Fig. 2(b)〉. 사용된 IMU 센서는 2.4 GHz RF 장거리 무선 수신기가 탑재



(a; Attachment Sites of the IMU Sensors)



(b; Example Images of Level-Walking Assessment)

〈Fig. 2〉 Locations of IMU Sensors(a) and Joint-Angle Measurements(b).

되어 있으며, 센서 1개당 1,000 Hz의 주파수로 실시간 무선 데이터 처리가 가능하다. 또한 본 센서는 3축 자이로스코프, 3축 가속도계, 3축 지자기 센서가 내장된 소형 AHRS(Attitude and Heading Reference System) 모듈로, 보정된 원시 데이터 출력 및 단시간 위치 추적이 가능하다. 센서의 X축은 시상면(sagittal), Y축은 관상면(coronal), Z축은 수평면(horizontal) 방향의 움직임을 나타낸다.

1) 보행 이벤트 검출

피험자의 보행 데이터는 양측 발등에 부착된 IMU 센서의 Pitch 값을 이용하여 보행 주기를 구분하였다. 발등 Pitch 값의 최대점은 발꿈치가 닿는 순간(Heel Strike, HS), 최소점은 발끝 들림(Toe Off, TO) 시점으로 정의하였으며, 이를 기준으로 보행 주기를 입각기(HS→TO) 와 유각기(TO→HS) 로 분리하였다. 또한 HS 이벤트는 발등의 회전(Roll) 값이 급격히 변화하는 시점을 기준으로 판별하였다. 이를 통해 전체 보행 주기(100%)에서 입각기는 약 60%, 유각기는 약 40%로 구분되었다. 데이터 분석에는 15분간 수집된 자료 중 처음과 마지막 5분을 제외한 중앙 5분간의 자료를 사용하였다.

2) 좌표계 및 하지 관절 각도 정의

IMU 센서에서 출력된 오일러 각(Roll, Pitch, Yaw)을 기반으로 시상면(sagittal plane)에서 굴곡/신전, 관상면(frontal plane)에서 내전/외전, 수평면(transverse plane)에서 내회전/외회전을 각각의 골반, 고관절, 슬관절, 족관절의 운동을 측정하였다. 〈Table 2〉에는 각 관절에 대한 각도 측정에 대한 움직임에 대해 정리하였다. 여기에서 시상면(sagittal plane)은 인체를 좌우로 나누는 면으로 앞뒤로 일어나는 움직임을 관찰하는 것이며, 관상면(frontal plane)은 인체를 앞뒤로 나누는 면으로 외전, 내전과 같이 좌우로 일어나는 움직임을 관찰하는 것이다. 마지막으로, 수평면(transverse plane)은 인체를 위아래로 나누는 면으로 축회전의 움직임을 의미한다. 본 연구에서는 오일러 각의 Roll 값을 이용하여 내전각과 외전각을, Pitch 값을 이용하여 굴곡각과 신전각을, Yaw 값을 이용하여 내회전각과 외회전각을 산출하였다. 또한 각 관절의 가동범위(ROM)는 최대각에서 최소각을 뺀 값으로 계산하였다.

〈Table 2〉 Movements of the Pelvis, Hip, Knee, and Ankle in the Sagittal, Frontal, and Transverse Planes During Gait

Plane	Motion	Pelvis	Hip Joint	Knee Joint	Ankle Joint
Sagittal Plane	Flexion / Extension	Pelvic tilt in the anterior-posterior direction	Forward and backward movement of the thigh	Knee flexion and extension	Dorsiflexion (foot upward) and plantarflexion (foot downward)
Frontal Plane	Abduction / Adduction	Pelvic elevation and depression during stance and swing	Movement of the thigh away from or toward the body's midline	Minimal motion in normal gait; knee rotation is nearly absent in extension	Inversion and eversion (tilting of the sole inward/outward)
Transverse Plane	Internal / External Rotation	Pelvic rotation forward on the advancing side	Internal and external rotation of the femur	Rotation permitted only when the knee is flexed; nearly absent in full extension	Toe-in (internal) and toe-out (external) orientation of the foot

3) 운동학적 매개변수 산출 방식(Calculation of Indicators)

하지 관절의 운동학적 지표를 정확히 해석하기 위해서는 정상 성인의 보행 패턴에 대한 사전 이해가 필수적이다. Winter(2009)는 인체 보행을 운동학적으로 정량화하여, 하지 관절의 굴곡(flexion), 신전(extension), 및 관절 모멘트(joint moment)의 정상 범위를 제시하였다. 또한 Jin(2022)은 건강한 성인과 경증 지적 발달장애인을 비교하여, 보행 중 하지 관절의 굴곡각, 외회전각, 배측굴곡각, 저측굴곡각 등 주요 운동학적 변인을 분석하였다. An and Jung(2002)은 정상군과 편마비 환

〈Table 3〉 Calculation of Kinematic Indicators.

(unit:°)

Indicator	Definition	Calculation Method
Mean Flexion Angle	Average flexion angle during stance phase	Mean of Pitch values 〉 0 (stance phase)
Mean Extension Angle	Average extension angle during stance phase	Mean of Pitch values 〈 0 (stance phase)
Flexion/Extension ROM	Range of motion for flexion and extension	Maximum Pitch - Minimum Pitch (stance + swing)
Peak Internal Rotation	Peak inward rotation angle	Peak of negative Yaw values
Peak External Rotation	Peak outward rotation angle	Peak of positive Yaw values
Internal/External Rotation ROM	Range of motion for hip rotation	Maximum Yaw - Minimum Yaw
Peak Adduction	Average inward movement (toward midline)	Peak of negative Roll values
Peak Abduction	Average outward movement (away from midline)	Peak of positive Roll values
Abduction/Adduction ROM	Range of motion for lateral movement	Maximum Roll - Minimum Roll

자군의 보행 패턴을 비교하기 위해 굴곡-신전, 내반-외반, 내회전각 등의 지표를 활용하여 하지의 운동 특성을 규명한 바 있다. 본 연구에서는 이러한 선행연구를 토대로, 경증 발달장애인의 평지 보행 시 의복 조건이 하지 관절각에 미치는 영향을 다각적으로 분석하였다. 특히 보행 주기의 입각기(stance phase)와 유각기(swing phase)에 걸쳐 다양한 운동학적 매개변수를 산출하였으며, IMU 센서를 활용한 관절 운동 추정의 정확도를 높이기 위해 McCamley et al.(2012)의 방법을 참고하여 분석 기준을 수정·적용하였다〈Table 3〉.

4. 자료분석

수집된 모든 자료는 통계 분석 프로그램 SPSS 26.0 (IBM Corp., USA)을 이용하여 분석하였다. 의복압 측정결과 컨트롤 의복을 제외한 두 밀착바지 실험복 간의 차이를 보기 위해서는 대응 t-test를 실시하였다. 관절각 측정값에 대해서는 반복측정 분산분석(Repeated Measures ANOVA)을 수행하였다. 모든 통계 분석은 유의수준 $p < .05$에서 검정하였다.

III. 연구결과 및 고찰

1. 정량적 의복압

밀착형 바지의 의복압 측정결과는 〈Table 4〉와 같다. 측정 부위에 따라 통계적으로 유의한 차이가 나타난 곳도 있었으며, 특히 종아리 후면 부위에서 세 조건 간 차이가 뚜렷하게 확인되었다. 전반적으로 CP-H가 CP-L보다 높은 의복압을 보였으며, 이는 모든 부위에서 일관되게 나타났다.

CP-L의 의복압 범위는 0.65~1.72 kPa, CP-H는 0.86~2.32 kPa로 확인되었으며, 전반적으로 CP-H가 CP-L보다 높은 압력 수준을 보였다. 통계 분석 결과, 발목과 엉덩이를 제외한 모든 부위에서 CP-H의 의복압이 유의하게 높게 나타났다. 측정부위별로 살펴보면, 두 제품 모두 발목 부위에서 가장 낮은 의복압, 종아리 부위에서 가장 높은 의복압을 보였다. 허벅지 부위는 종아리에 비해 다소 낮은 수준으로 측정되었으며, 엉덩이 부위의 경우 CP-L은 0.84 kPa로 1.00 kPa 미만이었으나, CP-H는 1.12 kPa로 상대적으로 높은 값을 나타냈다. 이러한 차이는 제품 간 치수, 패턴 설계, 편직 구조 및 탄성 특성의 차이에서 기인한 것으로 판단된다(Sang et al., 2015). 특히 종아리 부위에서 가장 높은 압박이 나타난 이유는 하지 근육 중 비복근과 가자미근이 위치한 부위로, 의

〈Table 4〉 Clothing Pressure Measurements for Two Compression Pants

Measuring location		Clothing pressure		Paired T-test
		CP-L	CP-H	
		Mean(SD)	Mean(SD)	F
P1	Anterior thigh	1.42(.37)	1.65(.36)	2.353*
P2	Knee	1.58(.19)	1.94(.21)	2.848*
P3	Medial ankle	0.65(.12)	0.86(.22)	1.357
P4	Hip	0.84(.20)	1.12(.27)	2.237
P5	Posterior thigh	1.36(.32)	1.52(.29)	2.172*
P6	Posterior calf	1.72(.28)	2.32(.32)	3.216*

*p<.05

복이 신체의 곡면을 따라 밀착되는 과정에서 압력이 집중되기 때문으로 해석된다(Lee & Do, 2023; Sang et al., 2015). 반면 발목 부위는 둘레가 상대적으로 좁아 의복이 덜 밀착되므로, 종아리에 비해 낮은 의복압을 형성하는 것으로 보인다(Sarı & Oğlakcıoğlu, 2018). 또한 허벅지 부위에서의 압박력이 종아리에 비해 낮게 나타난 것은, 허벅지 근육의 질량이 크고 곡률이 완만하여 의복이 신체 표면에 밀착되는 정도가 상대적으로 낮기 때문으로 해석된다(Ye et al., 2023). 엉덩이 부위 역시 CP-H가 CP-L보다 높은 압력을 보였으나, 전반적으로 허벅지 및 종아리 부위에 비해서는 낮은 수준을 유지하였다.

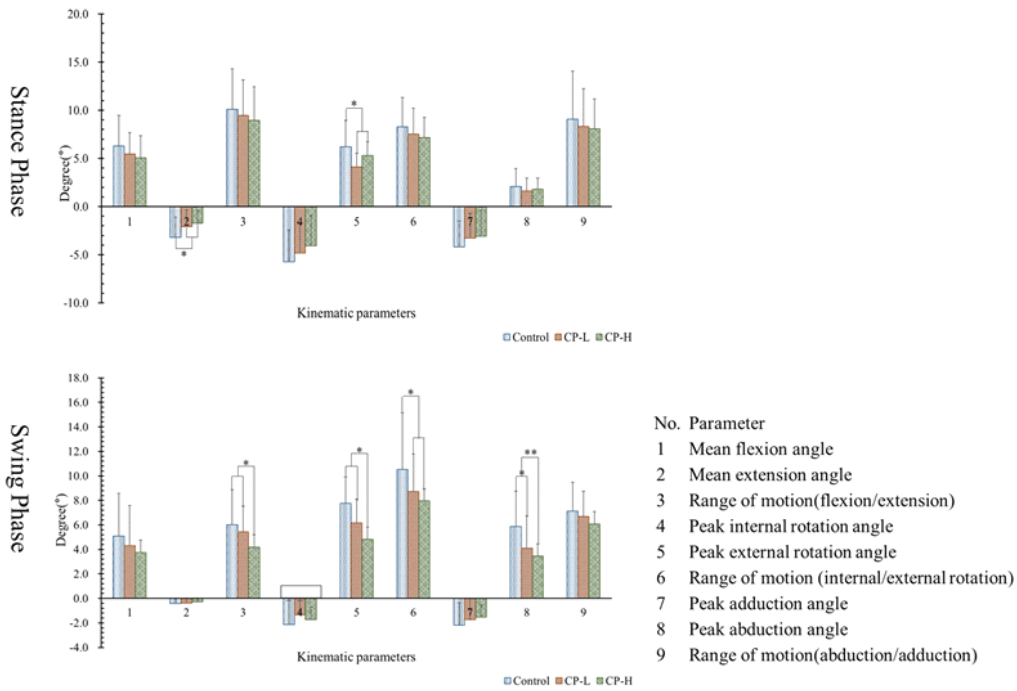
2. 운동학적 분석

실험복 조건별로 골반, 고관절, 슬관절, 족관절의 입각기(stance phase) 와 유각기(swing phase) 동안 나타난 굴곡/신전, 내·외회전, 내·외전 각도 및 가동범위(range of motion; ROM) 를 분석한 결과는 다음과 같다.

1) 골반

보행 주기 중 입각기(stance phase)와 유각기(swing phase) 동안 골반의 관절각 변화 양상을 분석한 결과는 〈Fig. 3〉과 같다. 골반 굴곡각이 양(+) 일 경우 전방 굴곡을, 신전각이 음(-) 일 경우 후방 신전이 제한됨을 의미한다. 입각기 동안 평균 굴곡각은 컨트롤 8.29° CP-L 5.18°, CP-H 3.08°로 나타나, 두 밀착 바지 착용 조건 모두 컨트롤 대비 유의한 감소를 보였다. 평균 신전각은 컨트롤 -3.07°, CP-L -2.08°, CP-H -1.72°로, CP-L과 CP-H 간에는 통계적으로 유의한 차이가 없었으나 두 조건 모두 컨트롤보다 유의하게 감소하였다. 유각기에서도 대부분의 지표가 컨트롤 대비 CP-L 및 CP-H 조건에서 감소하는 경향을 보였으며, 그중 신전 평균각과 외회전 최대각에서 유의한 차이가 확인되었다. 특히 신전 평균각은 컨트롤 -3.20°, CP-L -2.08°, CP-H -1.72°로 나타나, 밀착 바지 착용 시 골반의 굴곡 및 신전이 전반적으로 제한되는 경향을 보였다. 이 중 CP-H 착용 조건에서 유각기 동안 전방 굴곡이 가장 감소하였으며, 이는 경증 발달장애인에게서 흔히 나타나는 과도한 골반 보상 움직임을 완화하여 보행 안정성을 향상시킬 가능성을 시사한다. 한편, 본 연구의 피험자들은 입각기 동안 골반 신전이 충분히 이루어지지 않아, 상체의 무게중심이 전방으로 치우치는 특징을 보였다. 이러한 보행 패턴은 체간 안정성을 저하시켜 보폭 감소 및 보행 효율 저하로 이어질 수 있다. Naruse et al.(2017)은 ADHD 아동이 정상 아동보다 전방 골반 기울기(anterior pelvic tilt) 가 유의하게 크다고 보고하며, 과도한 전방 기울기가 균형 및 자세 조절에 부정적 영향을 미친다고 제시하였다. 또한 Suits et al.(2021)은 정상 성인의 평균 전방 골반 기울기가 약 13°(±6°) 수준임을 보고하며, 골반의 전후 기울기 변화가 보행과 자세 안정성에 중요한 역할을 한다고 강조하였다. 정상 보행에서는 골반의 전후 움직임이 보행 에너지 효율성 향상에 기여하지만, 경증 발달장애인의 경우 골반이 과도하게 전방으로 기울어진 상태에서 후방 신전이 충분히 이루어지지 않으면, 상체를 앞으로 숙여 체간 균형을 유지하게 된다. 이로 인해 상체 흔들림이 증가하고, 빠른 보행이나 방향 전환 시 균형 상실 위험이 높아지며, 보폭 감소 및 에너지 소모 증가로 인한 피로 누적이 발생할 수 있다.

입각기 동안의 외회전 최대각은 컨트롤 조건(6.22°)보다 CP-L(4.10°)에서 낮았으나, CP-H(5.26°)에서는 CP-L보다 다소 높은 값을 보였다. 외전 최대각은 컨트롤(2.10°) 대비 CP-L(0.90°)과 CP-H(0.82°)에서 모두 1.00° 미만으로 유의하게 감소하였다. 이외의 지표들은 컨트롤 조건에 비해 전반적으로 감소 경향을 보였으나, 통계적으로 유의한 차이는 나타나지 않았다. 또한 유각기에서도



〈Fig. 3〉 Dynamic Pelvic Kinematics during the Stance and Swing Phases(b) of Gait.

외회전 최대각이 컨트롤보다 두 밀착 바지 조건에서 낮게 나타나, 밀착 바지 착용 시 보행 중 골반의 과도한 회전이 억제됨을 확인할 수 있었다. 일반적으로 정상 성인의 보행에서 골반의 외회전각은 약 4~5° 수준으로 보고되는데(An & Jung, 2002), 본 연구의 피험자는 컨트롤 조건에서 6.22°로 정상 범위보다 다소 높은 값을 보였다. 반면, 밀착 바지 착용 시 CP-L에서는 4.10°, CP-H에서는 5.26°로 나타나, 의복압이 높을수록 외회전각이 다소 증가하는 경향을 보였다. 한편, 본 연구에서 피험자의 골반 내회전각은 음수 값으로 나타나, 정상적인 내회전이 부족하고 외회전이 과도하게 일어남을 의미한다. 정상 보행에서는 보행 주기마다 내회전과 외회전이 교대로 반복되는 리듬이 유지되지만, 본 연구의 피험자들은 외회전이 우세한 경향을 보여 발끝이 바깥쪽으로 향하는 외족지 보행(out-toeing gait) 양상을 보였다. 이러한 보행 패턴은 일정 수준의 안정성을 확보할 수 있으나, 체간 흔들림 증가, 보행 효율 저하, 피로 누적 등의 부정적 영향을 초래할 수 있다.

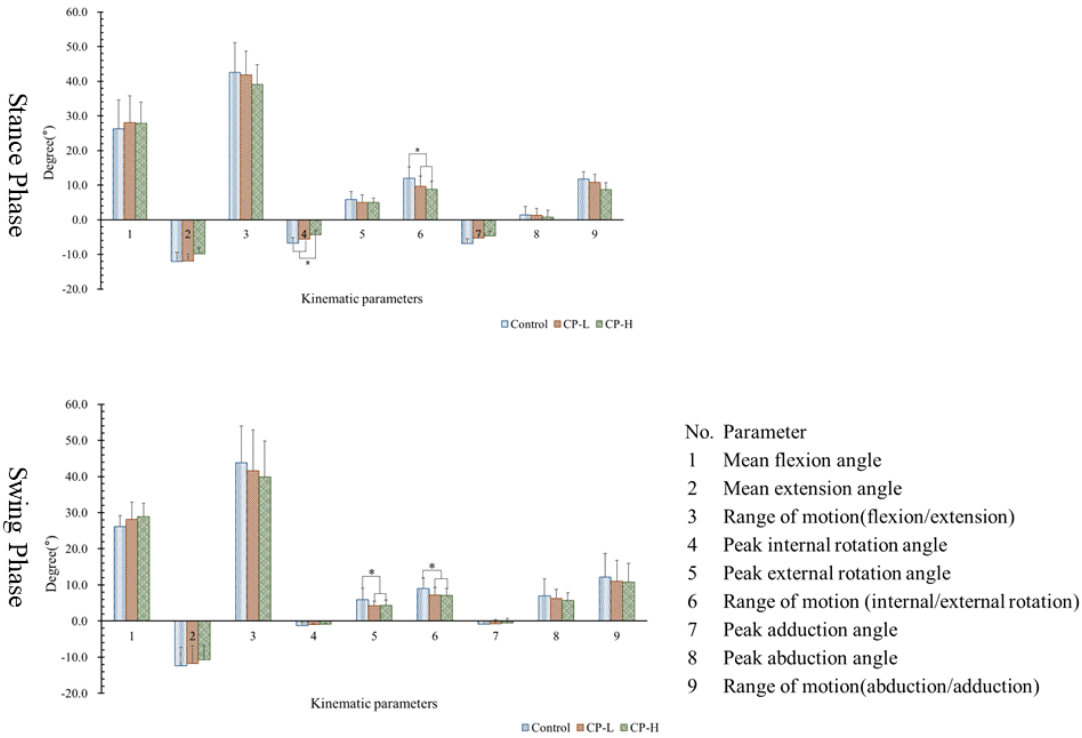
종합하면, CP-L 착용 조건에서 제공되는 적정 수준의 의복압은 발달장애인의 불균형한 보행 경향을 완화하고, 골반 관절에서 일정 수준의 안정성을 확보하는 데 기여한 것으로 판단된다.

2) 고관절

고관절에서의 입각기와 유각기 동안의 관절각 변화 결과는 〈Fig. 4〉에 제시하였다. 입각기(stance phase)에서는 내회전 최대각과 내·외회전 가동범위(range of motion; ROM) 에서 통계적으로 유의한 차이가 나타났다. 내회전 최대각은 컨트롤 조건(-6.76°)보다 CP-L(-4.43°) 및 CP-H(-4.02°) 착용 시 모두 감소하였다. 유각기(swing phase)에서는 외회전 최대각과 내·외회전 ROM에서 유의

한 차이가 확인되었으며, 두 지표 모두 CP-L과 CP-H 간의 통계적 차이는 없었으나, 컨트롤 조건 대비 유의하게 감소하였다(p<.05). 특히 고관절의 내회전-외회전 ROM은 CP-L(허벅지 압력 1.36~1.42 kPa)보다 CP-H(1.52~1.65 kPa) 에서 더 큰 폭으로 감소하였다. 이는 허벅지 부위의 의복압이 높을수록 하지의 회전 움직임이 제한되어, 발의 전·후방 추진력이 감소하고 결과적으로 보폭 단축 및 보행 속도 저하로 이어질 수 있음을 시사한다. 반면, 입각기 동안 CP-H 착용 시 외전 및 내전 각도 모두 컨트롤과 CP-L 조건보다 낮게 나타나, 의복압이 높을수록 고관절의 좌우 흔들림이 억제되어 보행 안정성이 향상될 가능성을 확인하였다. 정상 성인의 보행에서 고관절의 굴곡-신전 ROM은 입각기 동안 약 40~50° 범위로 보고되는데 (Mullerpatan et al., 2025), 본 연구의 경증 발달장애인 피험자는 평균 42.5°로 정상 하한 수준을 보였다. 이는 보행 시 발을 충분히 전방으로 뻗지 못해 추진력이 부족하고, 보행 효율 저하 및 이상 보행 패턴으로 이어질 가능성을 내포한다.

입각기 동안의 최대 외전각 역시 컨트롤 조건(-6.88°)보다 CP-L(-5.23°) 및 CP-H(-4.19°) 에서 낮게 나타나, 밀착 바지 착용이 고관절의 회전 및 외전 움직임을 제한하는 효과를 보였다(p<.05). 정상 성인의 내회전-외회전 ROM은 일반적으로 약 ±10~15° 범위로 보고되지만, 발달장애인의 경우 이러한 회전 범위가 제한되어 보폭이 감소하고, 하지의 회전 반동이 줄어들어 보행 속도 및 효율이 저하될 가능성이 있다. 또한 정상 성인의 내전-외전 ROM은 약 8~12° 수준으로, 체간 균형



〈Fig. 4〉 Dynamic Hip Kinematics during the Stance and Swing Phases of Gait.

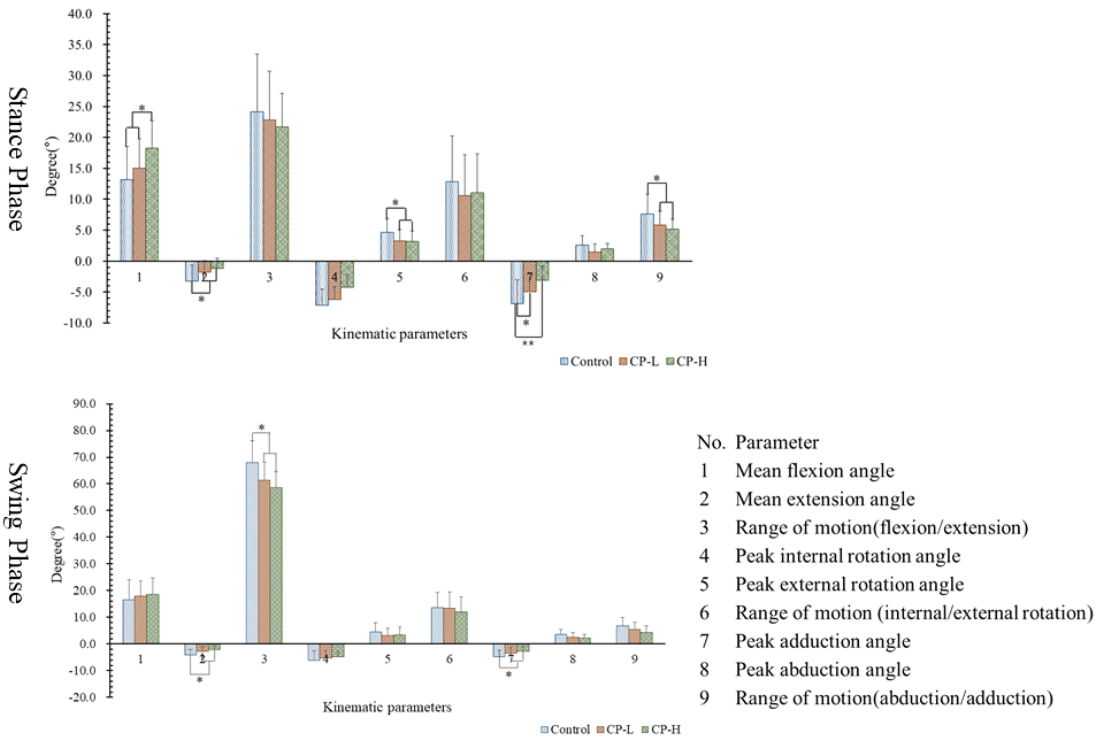
유지 및 보행 안정성 확보에 핵심적인 역할을 한다. 그러나 발달장애인은 보행 시 지지 다리의 체중 부하 능력이 상대적으로 부족하여, 골반의 굴곡과 신전에 의한 보상 움직임이 증가하는 경향을 보인다. 이러한 과도한 보상 작용은 체간 균형 조절의 어려움으로 이어져 보행 안정성을 저하시킬 위험이 있다. 따라서 발달장애인을 위한 보행 보조용 밀착 바지 설계 시, 허벅지 부위의 의복압 수준을 정밀하게 조절하여 보행 안정성을 향상시키는 동시에, 보폭 단축이나 속도 저하와 같은 부정적 영향을 최소화할 필요가 있다.

3) 슬관절

보행 주기 동안 슬관절의 관절각 변화 결과는 〈Fig. 5〉에 제시하였다.

입각기(stance phase)에서는 굴곡(flexion), 신전(extension), 외회전 최대각, 내전 최대각, 그리고 내·외전 가동범위(range of motion; ROM) 에서 통계적으로 유의한 차이가 나타났다. 굴곡각의 경우, 컨트롤 조건은 13.20°, CP-L은 15.04°로 두 조건 간 통계적으로 유의한 차이는 없었으나, CP-H(18.25°) 에서 유의하게 증가하였다($p<.05$). 신전각은 컨트롤(-3.26°)에 비해 CP-L(-1.83°) 과 CP-H(-1.17°) 모두에서 유의하게 감소하였으며, 두 밀착 바지 간에는 차이가 나타나지 않았다. 유각기(swing phase)에서는 평균 신전각, 굴곡-신전 ROM, 내번 최대각에서 유의한 차이가 확인되었다. 평균 신전각은 컨트롤(-4.28°)보다 CP-L(-2.67°)과 CP-H(-2.15°)에서 모두 유의하게 감소하였다. 이러한 결과는, 상대적으로 높은 의복압을 가진 CP-H(종아리 2.32 kPa, 무릎 1.94 kPa) 착용 시 입각기 동안 슬관절의 굴곡이 증가하고 신전이 감소함을 의미한다. 또한 굴곡-신전 ROM과 외회전각이 모두 감소하여, 압박 수준이 높을수록 하지의 전방 신전 동작이 제한되고 보폭이 단축될 가능성이 있음을 시사한다. 정상 성인의 유각기에서 굴곡-신전 ROM은 약 55~65°로 보고되나(Mullerpatan et al., 2025), 본 연구의 발달장애인 피험자는 최대 67.9°로 다소 크게 나타났다. 이는 보행 시 충격 흡수 및 안정성 확보를 위한 보상 작용으로 해석될 수 있다. 그러나 과도한 굴곡은 보행 추진력 감소, 보폭 축소, 에너지 소비 증가로 이어질 가능성이 있으며, 신전이 충분히 이루어지지 않을 경우 입각기 말기(heel-off 및 toe-off)에서 추진력이 약화되어 보행 속도가 저하될 수 있다(Kınacı Biber et al., 2025). 또한 발달장애인은 정상 성인보다 슬관절의 굴신 범위가 좁고, 굴곡·신전 속도가 느리며, 착지 및 체중 지지 시 무릎이 과도하게 굴곡된 상태를 유지하는 경향을 보인다. 이는 Haynes et al.(2012)의 연구에서 보고된 바와 같이, 착지 시 무릎 굴곡이 정상보다 크고 신전이 부족한 보행 특성과 일치한다.

특히 내전 최대각에서 조건 간 차이가 가장 뚜렷하게 나타났다. 컨트롤 조건(-6.88°)은 CP-L(-4.96°) 보다 유의하게 낮았으며($p<.05$), CP-H(-3.08°) 와는 더욱 큰 차이를 보였다($p<.01$). 또한 내전-외전 ROM은 컨트롤 대비 밀착 바지 착용 시 감소하는 경향을 보였으며($p<.05$), 유각기(swing phase) 의 굴곡-신전 ROM과 내전 최대각 역시 동일한 경향을 보여, 두 지표 모두 밀착 바지 착용 시 관절 가동범위가 유의하게 감소하였다($p<.05$). 이러한 결과는 무릎 내회전 범위가 감소함에 따라 체간·고관절·슬관절의 회전 반동이 줄어들고, 그에 따라 보행 추진력이 약화될 수 있음을 시사한다. 반면, 무릎의 내·외전 움직임 감소는 보행 시 좌우 흔들림을 줄여 안정성을 향상시키는 긍정적 효과를 보였다. 그러나 동시에 굴곡-신전 및 내회전 범위의 축소는 균형 조절 여유를 감소시켜, 낙상에 대한 방어 능력을 저하시킬 가능성이 있다. 따라서 밀착의류는 컨트롤 조건에 비해 경증 발달장애인의 보행 안정성 향상에 일정 부분 기여할 수 있으나, 과도한 의복압은 관절의 운동 자유도를 제한하여 일부 지표에서 부정적 영향을 초래할 수 있음을 의미한다. 이에 따라 발달장애

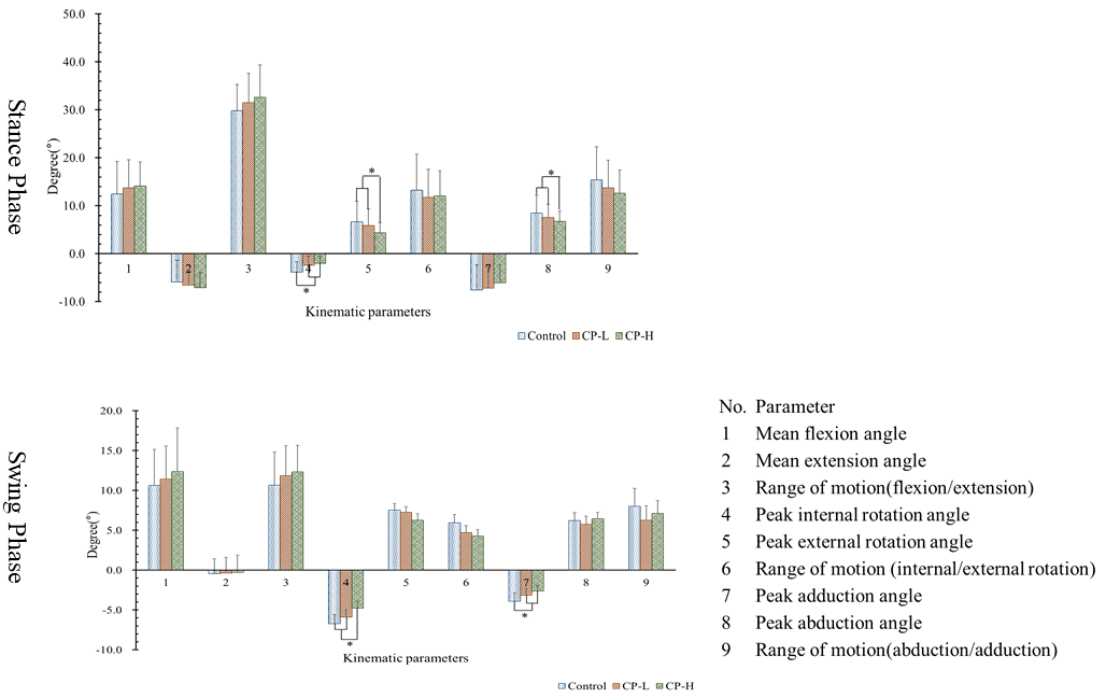


〈Fig. 5〉 Dynamic Knee Kinematics during the Stance and Swing Phases of Gait.

인의 보행 보조용 밀착의류 설계 시, 안정성과 운동 효율을 균형 있게 고려한 적정 압박 강도 설정이 필요하다.

4) 족관절

족관절의 보행 시 관절각 변화를 분석한 결과는 〈Fig. 6〉에 제시하였다. 입각기(stance phase)에서 족관절의 운동학적 지표는 전반적으로 컨트롤 조건 대비 CP-L 및 CP-H 착용 시 감소하는 경향을 보였다. 통계적으로 유의한 차이는 내회전 최대각, 외회전 최대각, 외번 최대각에서 확인되었다. 내회전 최대각은 컨트롤(-3.85°)에 비해 CP-L(-2.43°) 및 CP-H(-2.04°) 에서 감소하였으며, 두 밀착 바지 간에는 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다(p>.05). 외회전 최대각의 경우, 컨트롤(6.67°)과 CP-L(5.48°)은 유사한 수준이었으나, CP-H(5.12°)에서는 유의하게 감소하였다. 또한 외번 최대각에서도 컨트롤(8.45°)과 CP-L(7.52°) 간에는 차이가 없었지만, CP-H(6.21°)에서 유의한 감소가 관찰되었다(p<.05). 이러한 결과는 밀착 바지 착용이 족관절의 회전 및 외전 움직임을 억제하여 관절의 과도한 변위를 제한하는 효과를 지님을 시사한다. 반면, 유각기(swing phase)에서는 족관절의 대부분 지표가 컨트롤 대비 밀착 바지 착용 시 증가하는 경향을 보였다. 통계적으로 유의한 차이는 내회전 최대각과 내전 최대각에서 확인되었다. 내회전 최대각은 컨트롤(-6.52°) 〉 CP-L(-5.74°) 〉 CP-H(-4.35°) 순으로 나타나, 의복압이 높을수록 내회전 움직임이 감소하는 경향을 보였다. 내전 최대각의 경우 CP-L과 CP-H가



〈Fig. 6〉 Dynamic Ankle Joint-Angle Patterns during the Stance and Swing Phases of Gait.

통계적으로 유사한 수준을 보였으며, 두 조건 모두 컨트롤 대비 유의하게 감소하였다($p<.05$). 이러한 결과는 밀착 바지의 압박이 족관절의 회전 및 내전 움직임을 안정화시켜 보행 중 발의 좌우 흔들림을 줄이고 균형 유지에 기여할 가능성을 시사한다. 그러나 동시에 의복압이 과도할 경우 발의 자유로운 회전과 추진 동작을 제한할 우려가 있으므로, 발달장애인의 보행 특성에 적합한 부위별 압박 강도 조절이 필요함을 보여준다.

본 연구에서 측정된 발목 부위의 의복압은 CP-L 0.64 kPa, CP-H 0.86 kPa 수준으로 나타났으며, 이 범위에서는 발목의 배측굴곡(dorsiflexion) 과 저측굴곡(plantarflexion) 간에 통계적으로 유의한 차이가 확인되지 않았다. 따라서 보행 시 착지(heel strike) 및 발차기(toe-off) 단계에서의 발목 굴곡 움직임은 본 연구의 의복압 수준에서 큰 영향을 받지 않는 것으로 판단된다. 다만, 입각기에서 저측굴곡이 제한될 경우 보행 추진력 감소로 이어질 수 있고, 유각기에서 족배굴곡이 충분히 이루어지지 않을 경우 발 끌림으로 인한 낙상 위험이 증가할 가능성이 있다. 그럼에도 불구하고, 본 연구에서 나타난 0.64~0.86 kPa 범위의 발목 의복압은 발달장애인의 보행 보조용 의류 설계 시 적정 수준의 압박 강도로 해석된다. Park et al.(2003, as cited in Cornwall & McPoil, 1999)은 정상인의 입각기 동안 평균 발등 굽힘각도(dorsiflexion angle)를 20°(13~33°) 수준으로 보고하였다. 이에 비해 본 연구의 경증 발달장애인 피험자는 컨트롤 조건에서 12.45°로 정상인보다 낮은 수준을 보였다. 그러나 밀착 바지 착용 시 통계적으로 유의한 차이는 없었으나 컨트롤 대비 수치적으로 증가하는 경향을 보여, 적정 수준의 의복압을 적용할 경우 발등 굽힘각이 추가적으로 증가할 가능성이 있다. 보행 추진력은 주로 고

관절의 신전 움직임에서 발생하지만, 느린 속도의 보행에서는 족관절 또한 추진력 생성에 중요한 역할을 담당한다(Riley et al., 2001). 따라서 발목 부위의 적정 의복압 설정은 보행 보조 의류 설계 시 매우 중요한 요인으로 고려되어야 한다. 한편, 내회전-외회전 ROM은 컨트롤보다 밀착 바지 착용 시 감소하였으며, 이는 허벅지 및 종아리 부위의 압박으로 인한 발목 회전 자유도 제한의 결과로 해석된다. 또한 내전·외전 각도는 CP-H 조건에서 감소하여, 보행 중 발의 좌우 흔들림을 줄이고 안정성 향상에 기여하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 선행연구와도 일치한다. Luo et al.(2023)은 발목 보조기 착용 시 내전·외전 각도와 회전 속도가 감소하여 발목 안정성이 향상된다고 보고하였으며, Stotz et al.(2021)은 달리기 시 보조기 착용으로 내전 각도가 47~58% 감소함을 확인하여 발목 안정성 강화 효과를 제시하였다. 또한 Hijmans et al.(2008)은 의료용 압박복 착용이 발 관절 위치 감각을 향상시켜 좌우 흔들림 제어 능력을 개선한다고 보고하였다.

종합하면, 본 연구결과는 CP-H와 같은 높은 수준의 의복압이 발목의 내전·외전 움직임을 일정 부분 제한함으로써 발 안정성 증진에 기여할 수 있음을 보여준다.

IV. 결론 및 제언

본 연구는 경증 발달장애인을 대상으로 압박 수준이 서로 다른 밀착 바지(CP-L, CP-H)와 루즈핏 컨트롤 조건에서 트레드밀 보행 시 골반, 고관절, 슬관절, 족관절의 관절각 변화를 분석하여, 압박 수준이 보행 시 안정성과 균형에 미치는 운동학적 영향을 평가하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 밀착 바지의 의복압 측정 결과 CP-L은 0.65~1.72 kPa, CP-H는 0.86~2.32 kPa로, 전반적으로 CP-H가 높은 압박 수준을 보였다. 특히 종아리 부위에서 CP-L 1.72 kPa, CP-H 2.32 kPa로 가장 큰 차이가 나타났다.

둘째, 골반에서는 입각기 동안 평균 굴곡각이 컨트롤(8.29°) 대비 CP-L(5.18°), CP-H(3.08°)에서 유의하게 감소하였으며, 평균 신전각 역시 컨트롤(-3.07°)에 비해 CP-L(-2.08°), CP-H(-1.72°)로 제한되었다. 외전 최대각 또한 컨트롤(2.10°) 대비 CP-L(0.90°), CP-H(0.82°)로 감소하였다. 이러한 결과는 밀착 바지 착용이 골반의 과도한 전방경사와 좌우 흔들림을 억제하여 보행 안정성을 향상시킬 수 있음을 시사한다. 다만 CP-H에서는 외회전이 CP-L보다 오히려 증가(5.26°) 하는 경향을 보여, 과도한 압박은 오히려 불안정성을 초래할 수 있음을 확인하였다. 따라서 골반의 안정적 움직임을 위한 적정 의복압은 엉덩이 부위 약 0.84 kPa 수준으로 사료된다.

셋째, 고관절에서는 내회전 최대각이 컨트롤(-6.76°) 대비 CP-L(-4.43°), CP-H(-4.02°)에서 감소하였으며, 내·외회전 ROM은 CP-H에서 더 크게 줄어들어 보폭 단축 및 추진력 저하 위험이 확인되었다. 이는 허벅지 부위의 압박이 높을수록 다리의 전·후방 뻗기 동작이 제한되기 때문이다. 따라서 고관절의 안정성과 이동성의 균형을 고려할 때, 엉덩이 약 0.84 kPa, 허벅지 전·후면 1.36-1.42 kPa 수준의 압박이 적정한 것으로 사료된다.

넷째, 슬관절에서는 입각기 동안 평균 굴곡각이 컨트롤(13.20°)에서 CP-H 착용 시 18.25°로 증가하였으며, 평균 신전각은 -3.26°에서 -1.17°로 감소하였다. 또한 내번 최대각은 컨트롤(-6.88°) 대비 CP-L(-4.96°), CP-H(-3.08°)로 유의하게 감소하였다. 이러한 결과는 압박이 높을수록 좌우 흔들림이 줄어 안정성은 향상되지만, 과도한 압박은 보행 추진력과 보폭을 저하시킬 수 있음을 의미한다. 이에 따라 슬관절 부위의 보행 보조를 위한 적정 의복압은 허벅지 1.36-1.42 kPa, 무릎 1.58 kPa, 종아리 1.72 kPa 수준이 적절한 것으로 사료된다.

다섯째, 족관절에서는 내회전·외회전 및 외번 각도가 밀착 바지 착용 시 유의하게 감소하였다. 예를 들어, 외회전 최대각은 컨트롤(6.67°)에서 CP-H(5.12°)로, 외번 최대각은 8.45°에서 6.21°로 감소하였다. 반면, 배측굴곡과 저측굴곡은 0.64-0.86 kPa의 의복압 범위에서 통계적으로 유의한 차이가 없어 착지(heel strike) 및 발차기(toe-off) 단계의 굴곡 움직임에는 큰 영향을 미치지 않았다. 따라서 발목 부위의 안정성 확보를 위한 적정 의복압은 종아리 1.80-2.10 kPa, 발목 약 0.90 kPa 수준이 적절한 것으로 사료된다.

이상의 결과를 종합하면, 압력수준이 다른 밀착 바지의 착용은 경증 발달장애인의 보행의 안정성에 기여함을 확인할 수 있었다. 다만 본 연구에서는 전반적인 밀착 바지의 압력수준을 변인으로 실험을 진행했으나, 인체 부위를 기준으로 살펴보면, 골반·고관절·슬관절은 CP-L 수준이 적합하며, 발목·종아리는 CP-H 수준이 효과적임을 확인하였다. 이러한 결과는 경증 발달장애인의 보행 보조를 위한 밀착 바지 설계 시 인체 부위별 압박 가이드 라인으로 활용할 수 있을 것이다. 즉, 경증 발달장애인의 보행 보조 의복 개발 시 하퇴부(발목·종아리) 안정화와 상위 관절의 이동성은 보존해야한다는 설계 방향을 제시할 수 있다. 결론적으로 본 연구는 발달장애인의 보행 특성을 고려할 때, 골반 및 엉덩이 0.80-1.00 kPa, 허벅지 1.35-1.50 kPa, 무릎 1.55-1.75 kPa, 종아리 1.80-2.10 kPa, 발목 0.90 kPa, 수준의 압박이 최적의 의복압 조합으로 제안할 수 있다. 본 연구는 경증 발달장애인의 보행의 안정 및 균형에 도움을 줄 수 있는 밀착 바지 설계에 기초자료로 활용 가능성이 있다. 다만, 본 연구는 두 종류의 시판 밀착 바지에 한정하여 실험을 수행하였다는 점에서 일반화에 제한이 있다. 그럼에도 불구하고, 하지 부위별로 발달장애인의 안정적인 보행을 지원할 수 있는 적정 의복압 수준을 정량적으로 제시했다는 점에서 연구의 의의가 있다. 향후 연구에서는 다양한 연령층과 장애 수준을 고려한 장기적 보행 안정성 검증, 그리고 개인 맞춤형 압박 설계 기준의 체계적 확립이 필요하다.

참고문헌

Accardo, P. & Whitman, B. (1989). A marker for language disorders: in the developmentally disabled. *Clinical Pediatrics, 28*(8), 347-350. https://doi.org/10.1177/000992288902800802

An, C. & Jung, S. (2002). Study on gait analysis of normal adult and hemiplegia patients. *Journal of Korean Physical Therapy, 14*(3), 129-135.

Chung, C.-M. & Shin, S.-H. (2020). The effect of compression garment pressure intensity on gait: Comparison of treadmill and ground walking. *The Korea Journal of Sports Science, 29*(5), 1161-1171. https://doi.org/10.35159/kjss.2020.10.29.5.1161

Haynes, C. A., Oppewal, A., & Hilgenkamp, T. I. M. (2012). Evaluation of gait and slip parameters for adults with intellectual disability. *Journal of Biomechanics, 45*(14), 2470-2477. https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2012.06.016

Hijmans, J., Zijlstra, W., Geertzen, J. H., & Hof, A. L. (2008). Foot and ankle compression improves joint position sense but not bipedal stance in older people. *Gait & Posture, 29*(2), 322-325. https://doi. org/10.1016/j.gaitpost.2008.10.051

Jin, D. H. (2022). Comparison of kinematic data during walking between healthy people and persons with mild intellectual disability. *PNF and Movement, 20*(1), 19-29. https://doi.org/10.21598/JKPNFA.2022.20.1.19

Kim, H. S. (2024). The effects of fixed and graduated application percentage-type compression leggings in adult women with mild in-toeing gait. *Textile Research Journal, 94*(3-4), 434-450. https://doi.org/10.1177/00405175231208022

Kınacı Biber, E., Gys, L., Jansen, A. C., Schoonjans, A. S., Van Dijck, A., Kooy, R. F., ... & Hallemans, A. (2025). Investigation of gait characteristics and kinematic deviations in rare genetic disorders with instrumented gait analysis. *Journal of Intellectual Disability Research, 69*(5), 383-392. https://doi.org/10.1111/jir.13218

Lee, J. & Do, W. (2023). Clothing pressure analysis of commercial women's leggings for applying medical compression classes. *Fashion and Textiles, 10*(1), 8. https://doi.org/10.1186/s40691-022-00324-6

Luo, Y., Hu, M., Li, Z., Huang, X., Wu, D., Li, F., & Wang, S. (2023). Effect of lace-up ankle brace on the tibiotalar and subtalar joint during the landing.

Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 11, 1255944. https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1255944

McCamley, J., Donati, M., Grimpampi, E., & Mazzà, C. (2012). An enhanced estimate of initial contact and final contact instants of time using lower trunk inertial sensor data. *Gait & Posture, 36*(2), 316-318. https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2012.02.019

Miyashita, T., Katayama, S., Yamamoto, A., Sakamoto, K., Kitano, M., Takasaki, R., & Kudo, S. (2021). The effect of functional biomechanics garment for walking. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 18*(23), 12415. https://doi.org/10.3390/ijerph182312415

Mullerpatan, R., Shetty, T., & Agarwal, B. (2025). Influence of age and gender on gait kinematics of pelvis and hip in healthy adults aged 19-60 years. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 12*, 1515583. https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1515583

Naruse, H., Fujisawa, T. X., Yatsuga, C., Kubota, M., Matsuo, H., Takiguchi, S., … & Kato, N. (2017). Increased anterior pelvic angle characterizes the gait of children with attention deficit/hyperactivity disorder (ADHD). *PLoS ONE, 12*(1), e0170096. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0170096

Park, K. H., Kwon, O. Y., & Kim, Y. H. (2003). Effects of walking speed on foot joint motion and peak plantar pressure in healthy subjects. *Physical Therapy Korea, 10*(1), 77-95.

Riley, P. O., Della Croce, U., & Kerrigan, D. C. (2001). Propulsive adaptation to changing gait speed. *Journal of Biomechanics, 34*(2), 197-202. https://doi.org/10.1016/S0021-9290(00)00174-3

Sang, J. S., Lee, M. S., & Park, M. J. (2015). Structural effect of polyester SCY knitted fabric on fabric size, stretch properties, and clothing pressure. *Fashion and Textiles, 2*(1), 22. https://doi 10.1186/s40691-015-0047-4

Sarı, B. & Oğlakcıoğlu, N. (2018). Analysis of the parameters affecting pressure characteristics of medical stockings. *Journal of Industrial Textiles, 47*(6), 1083-1096. https://doi: 10.1177/1528083716662587

Stotz, A., Martínez, A., & Witte, K. (2021). Effects of compression garments on running kinematics and performance. *Frontiers in Sports and Active Living, 3*, 670032. https://doi.org/10.3389/fspor.2021. 670032

Suits, W. H., Vrabec, J. T., & Dowd, E. T. (2021). Clinical measures of pelvic tilt in physical therapy. *International Journal of Sports Physical Therapy, 16*(4), 968-978. https://doi.org/10.26603/001c.26968

Wilmut, K., Du, W., & Barnett, A. L. (2016). Gait patterns in children with developmental coordination disorder. *Experimental Brain Research, 234*(6), 1723-1734. https://doi.org/10.1007/s00221-015-4536-9

Winter, D. A. (2009). *Biomechanics and motor control of human movement* (4th ed.). John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9780470549148

Ye, C., Liu, R., Ying, M. T., Liang, F., & Shi, Y. (2023). Characterizing the biomechanical transmission effects of elastic compression stockings on lower limb tissues by using 3D finite element modelling. *Materials & Design, 232*, 112182. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112182

Zhang, N. & Liu, C. (2022). Study on the influence of elastic compression pants elasticity and movement speed on human joint protection. *Fibres & Textiles in Eastern Europe, 30*(6), 80-90. https://doi.org/10.2478/ftee-2022-0055