



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석사학위논문

보행 분석을 활용한 인지기능 장애 노인의
낙상 위험도 평가: 체계적 문헌고찰 및 메타분석

Fall Risk Assessment in Elderly with
Cognitive Disorder Using Gait Analysis:
Systemic Review and Meta Analysis

유 아 현

한양대학교 대학원

2025년 2월

석사학위논문

보행 분석을 활용한 인지기능 장애 노인의
낙상 위험도 평가: 체계적 문헌 고찰 및 메타분석

지도교수 조성호

이 논문을 공학 석사학위논문으로
제출합니다.

2025년 2월

한양대학교 대학원

디지털의료융합학과

유아현

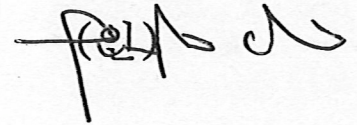
이 논문을 유아현의 석사학위 논문으로 인준함

2025년 2월

심사위원장 : 박현경

심사위원 : 전진용

심사위원 : 조성호



한양대학교 대학원

차 례

차 례.....	i
국문요지.....	ii
제1장 서 론	1
제1절 연구의 필요성	1
제2절 연구의 목표	3
제2장 방 법	3
제1절 분석대상 및 자료 수집 방법	3
제2절 문헌의 선정 및 제외기준	4
제3절 자료 추출 및 질 평가	5
제4절 데이터 분석 및 윤리적 고려사항	6
제3장 결 과	7
제1절 보행분석과 인지기능 장애	7
제2절 보행분석과 낙상	14
제3절 오픈 데이터셋을 활용한 검증	17
제4장 논 의	22
제5장 결 론	23
참 고 문 헌.....	25
보 충 자 료.....	30
ABSTRACT	35
감사의 글	37
연구윤리서약서(국문)	
연구윤리서약서(영문)	

국문요지

본 연구에서는 인지기능 장애 노인의 낙상 위험을 평가하기 위한 주요 보행 변수를 체계적 문헌고찰 및 메타분석을 통해 확인하였다. 인지기능 장애는 보행 능력의 저하와 낙상 가능성의 증가와 관련 있으며, 이러한 낙상 가능성을 정량적으로 평가할 수 있는 평가 도구의 중요성이 점차 커지고 있다.

본 연구는 최근 10년간 발표된 문헌 중 ‘보행분 석과 인지기능 장애’, ‘보행 분석과 낙상’ 을 주제로 진행된 연구를 수집하여 체계적으로 검토하였다. 그 결과, 보행 속도, 케이던스, 활보 길이와 같은 주요 보행 변수에서 인지기능 장애 코호트(MCI 코호트 및 치매 코호트)와 정상 코호트 간 유의미한 차이를 보였다. 특히, 보행 속도는 인지기능 저하의 초기 단계부터 민감하게 반영하는 것으로 나타났으며, 케이던스와 활보 길이 역시 낙상 위험 및 인지기능 저하 간의 상호작용을 반영하는 지표로 확인되었다.

또한, Mi-WiSH 오픈 데이터셋을 활용하여 메타분석 결과를 검증하였으며, 낙상군에서 정상 코호트에 비해 MCI 코호트에서 보행 속도, 케이던스, 활보 길이가 유의미하게 감소하는 경향을 보였다. 이는 메타분석의 결과와 일치하며, 주요 보행 변수들이 낙상 평가에 임상적 의의를 지닌다는 점을 시사한다.

본 연구는 보행 분석을 활용한 인지기능 장애 노인에서 낙상 위험 평가 및 예측의 가능성을 제시하며, 이를 통해 개인 맞춤형 낙상 예방 전략 수립과 보행 모니터링 프로그램 개발에 기여할 수 있을 것이다. 나아가, 본 연구는 보행 분석의 결과를 임상 현장에서 활용할 수 있는 기초 자료를 제공하고, 향후 웨어러블 기기 및 인공지능 기술을 활용한 보다 정교한 낙상 위험 예측 모델 개발을 위한 기반을 마련하였다.

제1장 서론

제1절 연구의 필요성

전 세계적으로 노인 인구가 늘고 고령화가 가속화되면서 인지 기능 장애의 유병률이 증가하고 있다. 국내 노인의 기준은 65세 이상으로, 2023년 기준 노인 인구는 전체 인구의 18.4%를 차지했으며, 이 비율은 지속적으로 증가하고 있으며, 2025년에 이르면 초고령 사회에 진입할 것으로 보인다[1]. 인지 기능 장애는 기억력 손상, 언어 문제, 성격 변화, 행동의 변화 등을 초래하여 개인의 삶의 질과 인간 관계, 경제적 활동 등에 심각한 영향을 미친다[2]. 세계보건기구(World Health Organization, WHO)에 따르면, 2015년 기준, 전 세계적으로 약 4,700만 명이 치매를 앓고 있으며, 이 수치는 2050년까지 약 세 배로 증가할 것으로 보인다[3]. 인지기능 장애는 인지 기능 손상 정도에 따라 경도 인지 장애(Mild cognitive disorder, MCI)와 치매(Dementia)로 나뉜다. MCI는 노화 과정의 정상 인지 수준과 치매 사이의 중간 단계로 간주된다[4]. MCI는 기억력 뿐만 아니라 주의집중력이 저하되어 주변 환경에 대한 이해 수준이 감소할 수 있다[5]. 한편, 치매는 원인에 따라 알츠하이머 병(Alzheimer's disease, AD), 혈관성 치매(Vascular dementia, VaD), 전두측두엽 치매(Frontotemporal dementia, FTD), 루이소체 치매(dementia with Lewy bodies, DLB)로 구분되며 알츠하이머 병이 가장 흔하다[6].

인지기능 장애의 조기 발견과 진단을 위해 다양한 선별 도구가 개발되어 활용되고 있다. 이러한 도구들은 간단한 질문과 과제를 통해 피검사자의 인지기능 상태를 평가하며, 특히 치매 및 경도 인지 장애의 조기 발견과 진행 정도를 파악하는 데 중요한 역할을 한다. 대표적으로 간이 정신 상태 검사(Mini-Mental State Examination, MMSE)는 전 세계적으로 가장 널리 사용되는 평가도구로 기억력, 주의력, 계산,

언어능력, 시공간 구성력 등을 평가한다. MMSE는 간단하고 신속하게 실시할 수 있다는 장점이 있어 임상에서 많이 사용되고 있다[7], [8]. 몬트리올 인지 평가(Montreal Cognitive Assessment, MoCA)는 초기 단계의 인지 기능 장애를 감지하는 데 더 민감하여 경도의 인지 기능 장애의 평가에 유용하며, 조기 진단을 위한 중요한 도구로 인정 받고 있다[9], [10].

한편, 낙상은 노인 인구에서 중요한 공중보건 문제로 대두되고 있다. WHO에 따르면 미국 노인 인구에서 20-30% 매년 한 번 이상의 낙상을 경험하며, 이는 골절, 입원, 기능 상실 및 사망과 같은 심각한 결과를 가져올 수 있다[11]. 임상에서는 노인의 낙상 위험성을 평가하기 위해 다양한 평가도구가 개발되어 사용되고 있다. 대표적으로 낙상 위험도 평가 도구로 점수 체계의 Morse Fall Scale(MFS), Fall Risk Assessment Tool(FRAT)과 이동 시간에 의해 평가하는 Timed Up and Go(TUG) Test 등이 사용되고 있다. 하지만 이러한 도구들은 노인의 특수한 신체적 및 인지적 특성을 충분히 반영하지 못하고, 평가자의 주관적 판단에 따라 결과가 변동될 수 있다는 한계가 있다[12].

노인의 인지 기능 장애는 보행 및 균형 능력에 부정적인 영향을 미치며, 특히 복잡한 보행 과제나 환경 변화에 대한 대응 능력을 저하시켜 낙상 위험을 증가시킨다[13] 이러한 대상자들의 낙상 위험성을 정량적으로 평가할 수 있는 도구의 필요성이 대두된다. 최근 연구에서는 보행 분석(gait analysis)이 낙상 위험을 예측하고 평가하는 데 중요한 도구로 부상하고 있음을 보고하고 있다[14], [15]. 보행분석에서 사용되는 주요 보행 변수로는 보행 속도, 활보 길이(stride length), 케이던스(cadence), 보폭(step length), 보행 주기(gait cycle), 양발 지지 시간, 보행 변동성 등이 있으며, 이들은 신체적 및 인지적 건강 상태를 반영한다[16]. 활보 길이는 한쪽 발이 지면에 닿은 후 같은 발이 다시 지면에 닿을 때까지의 거리로, 보행의 효율성과 균형을 반영한다. 케이던스는 분당 걸음 수를 의미하며, 보행 리듬과 속도의 요소로서 보행 안정성과 관련이 있다. 이러한 보행 변수들에 대한 연구들에서 보폭의

불규칙성 증가나 보행 속도의 저하는 낙상의 위험을 높이는 요인으로 확인되고 있다[17], [18].

제2절 연구의 목표

종합하면, 인지기능 장애 노인에서 발생할 수 있는 낙상 위험성을 효과적으로 평가하고 예방하는 데에 보행분석을 활용하는 것은 객관적이고 정량적인 평가 방법이 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 인지 기능 장애와 보행분석, 낙상에 대한 기존 연구들을 체계적으로 고찰하고 메타 분석을 통해 보행분석을 통한 인지 기능 장애 노인에서 낙상 위험에 영향을 미치는 보행 변수를 확인하고자 하고 검증하고자 한다. 이를 통해 인지기능 장애 노인의 낙상 예방 전략 수립 및 모니터링, 보행 재활 프로그램 개발에 기여하고자 한다.

제2장 방 법

제1절 분석대상 및 자료 수집 방법

본 연구는 PRISMA 2020 Korean Checklist에 따라 진행되었다 [19]. 핵심질문은 PRISMA 2020 가이드라인에서 제시하는 질문 형성 도구인 PICOS에 따라 설정하였다. PICOS는 대상군(Population), 중재(Intervention), 비교군(Comparison), 결과(Outcome), 연구설계(Study design)의 다섯 가지 구성 요소로 이루어져 메타분석을 설계하는데 중요한 질문형성 도구이다. 본 연구의 연구대상은 65 세 이상으로, ‘보행 분석-인지기능 장애’ 부분에서는 인지기능 코호트를, ‘보행 분석-낙상’에서는 낙상 여부에 따른 그룹을 포함하였다. 중재방법으로는 보행분석에서 단일과제, 이중과제를 모두 수집하였으며, 분석에서는 단순화를 위해 단일과제의

결과만을 포함하였다. 비교중재는 설정하지 않았으며, 연구설계는 모두 포함하였다.

문헌 추출의 첫 번째 단계로, PubMed 데이터베이스를 활용하여 최근 10년 내에 출판된 문헌을 MeSH(Medical Subject Headings) 용어를 기반으로 검색식을 작성하였다. 보행분석과 인지기능에 대한 문헌은 ("gait analysis" OR "gait variation" OR "gait variability") AND ("cognitive disorder" OR "cognitive impairment") 으로 검색하였으며, 보행분석과 낙상은 ("gait analysis" OR "gait variation" OR "gait variability") AND ("fall" OR "fall risk") 으로 검색하였다.

두 번째 단계로 검색된 작업에서 제 2절의 선정 및 제외기준에 따라 검토하여 최종적으로 분석에 포함될 문헌을 선정하였다. 문헌 추출은 2024년 9월~10월에 수행되었다.

제2절 문헌의 선정 및 제외기준

본 연구에 포함된 문헌은 인지기능 장애에서의 낙상 위험성과 보행 변수 간의 연관성을 평가하기 위해 다음과 같은 선정기준과 제외기준을 기반으로 선별되었다.

1. 선정기준

(1) 사람을 대상으로 한 연구만을 포함하였다. 동물 대상 연구는 본 연구의 목적에 부합하지 않기 때문에 제외되었다. (2) 연구 대상자의 평균 연령이 65 세 이상인 연구만 포함하였다. 이는 인지기능 장애가 주로 노년층에서 발생에서 발생한다는 연구 목적에 부합하기 때문이다. (3) 인지기능 장애 관련 연구는 정상 코호트와 인지기능 장애 코호트를 비교한 연구를 포함하였다. 인지기능 장애가 보행 분석에 미치는 영향을 확인하기 위해 두 코호트 간의 차이를 비교한 연구가 필요하였다. (4) 인지기능 장애 관련 연구는 퇴행성 인지기능 장애(AD, VaD 등)를 가진 대상자만을 포함하였다. 이는 노화에 의해 발생하는 퇴행성 인지기능 장애가 보행 능력과 낙상 위험에 미치는 영향을 중점적으로 분석하기 위함이다. (5) 영어로 출판된 원문 논문만을 포함하였다. 영어는

국제적으로 가장 널리 사용되는 학술 언어이므로, 연구의 정확성과 일관성을 유지하기 위해 영어 논문만을 포함하였다. (6) 인지기능 장애는 명확한 선별 도구(MMSE, MoCA 등)를 사용하여 진단하고, 보행 분석은 정량적 도구를 사용한 연구, 낙상은 외상으로 인한 낙상이 아닌 경우를 포함하였다. 이는 연구의 객관성을 확보하고 신뢰할 수 있는 결과를 도출하기 위한 필수 요건이다.

2. 제외기준

다음과 같은 기준에 해당하는 연구는 제외하였다: (1) 특정 질환으로 인한 보행 이상을 다루는 연구는 제외되었다. 예를 들어, 파킨슨병, 뇌졸중, 류마티스 등과 같은 질환이 보행 이상을 유발하는 경우, 해당 연구는 인지기능 장애와 보행 간의 순수한 연관성을 분석하기 어렵기 때문에 제외하였다. (2) 보행 분석과 인지기능 장애 연구가 주된 목적이 아닌 경우도 제외되었다. 보행 분석이 연구의 부차적인 요소로 다루어진 연구는 본 연구의 초점에 맞지 않기 때문에 제외되었다.

제3절 자료 추출 및 질 평가

선택된 연구로부터 다음과 같은 데이터를 추출하였다: 보행 변수(보폭, 보행 속도, 보행 변동성 등), 인지기능 선별 도구(MMSE, MoCA 등), 낙상 발생 여부, 각 연구의 연구 대상자 정보(평균 연령, 성별, 인지기능 장애 유형)와 보행 분석에 사용된 도구(압력 센서, 동작 분석 시스템 등)도 추출하였다.

문헌의 질 평가는 Newcastle-Ottawa Scale(NOS)을 사용하였다[20]. NOS는 주로 코호트 연구와 사례 대조 연구의 질을 평가하기 위해 개발된 도구로, 연구의 선정(최대 4 점), 비교성(최대 2 점), 결과(최대 3 점)의 세 가지 영역을 평가한다. 각 영역에서 특정 기준을 충족하면 점수를 부여하여 최대 9점까지 평가할 수 있으며, 점수가 높을수록 연구의 편향 위험이 낮고, 질이 높다고 간주한다. 이러한 평가를 통해 메타분석에

포함된 연구의 전반적인 질을 보장하였으며, NOS에 대한 결과는 보충자료 1에서 제시하고 있다..

제4절 데이터 분석 및 윤리적 고려사항

1. 데이터 분석 도구 및 분석 절차

통계 분석은 R 프로그램 Ver. 6.5.0의 library(meta)를 사용하여 수행하였다. 메타분석이 가능한 경우, 나이, 보행 속도, 보폭 등의 변수에 대한 그룹 간 차이를 분석하기 위해 평균 차(Mean difference, MD)를 구하였고, 이질성 평가(Heterogeneity test)를 수행하여 I^2 지수를 사용하였다. I^2 지수의 결과와 p-값을 고려하여 이질성이 유의한 것으로 판단하여 랜덤효과 모델을 적용하였고, 이질성이 낮은 경우 고정효과 모델을 적용하여 분석의 정밀성을 확보하였다. 문헌의 수가 적어 메타분석이 불가능한 경우 효과크기를 비교하여 분석하였다.

메타분석의 결과는 숲 그림(Forest Plot)을 활용하여 시각화 하였다. 또한, 출판 편향(Publication Bias)을 검토하기 위해 Funnel Plot을 사용하였다.

인지기능장애와 보행분석, 낙상과 보행분석으로 각각 문헌을 분석한 결과를 참고하여 인지기능 장애군과 낙상군의 보행변수에 대해 서술적으로 비교하였다. 본 연구에서는 편의에 따라 인지기능 분류를 정상 코호트, MCI 코호트, 치매 코호트로 분류하며, 낙상 경험 여부에 따라 낙상군, 비낙상군으로 명명하였다.

2. 검증 데이터

오픈소스 데이터 셋인 Mi-WiSH(Mind-Body Wellness in Supportive Housing) Study (ClinicalTrials.gov Identifier NCT02346136) 데이터셋을 활용하여 메타분석 결과와 실제 세계(real world) 데이터와의 일치 여부를 검증하였다. 이 데이터셋은 하버드 대학교의 의과대학에서 제공하는 데이터로, MMSE 결과, 고령자의 이동성과 균형을

평가하는 주요 지표로 활용되는 TUG 테스트 결과와 첫 인터뷰 시 한달 이내 낙상여부를 자가 보고 형태로 확인한 자료를 포함하고 있다. MMSE는 24 점 이상인 경우를 정상, 18 점 이상 23 점 미만인 경우 MCI, 17 점 이하인 경우를 치매로 분류하였다. TUG 테스트는 고령자의 이동성과 균형을 평가하는 주요 지표로, 본 연구에서는 TUG 테스트를 통해 얻은 보행 속도, 케이던스, 활보 길이 등의 변수를 활용하여 인지기능 장애의 낙상에 영향을 미치는 변수들을 분산 분석(Analysis of Variance, ANOVA)으로 통계 및 분석을 수행하였다.

3. 윤리적 고려사항

본 연구는 기존에 출판된 문헌을 바탕으로 한 체계적 문헌고찰 및 메타분석 연구로, 한양대학교 기관생명윤리위원회(Institutional Review Board, IRB)에서 심의 면제 승인을 받았으며, 포함된 모든 연구는 해당 연구가 수행된 기관의 IRB에서 승인을 받은 연구로 간주되었다. 데이터 검증을 위해 사용된 Mi-WiSH 데이터셋은 공개된 데이터로, 개인정보를 포함하지 않으므로 추가적인 윤리문제가 없음을 확인하였다.

제3장 결 과

제1절 보행분석과 인지기능 장애

PubMed에서 ("gait analysis" OR "gait variation" OR "gait variability") AND ("cognitive disorder" OR "cognitive impairment")으로 최근 10 년 간의 문헌을 검색한 결과 192건의 문헌 중 PubMed Filter을 통해 평균연령과 문헌의 언어를 기반으로 120 건이 1 차 제외되었으며, 2 차로 제목과 초록을 검토하여 54 건을 2 차로 제외되어 18 건을 리뷰하였으며, 최종적으로 메타분석에 사용될 수 있는 변수를 포함하는 9 건을 선정하였다(그림 1).

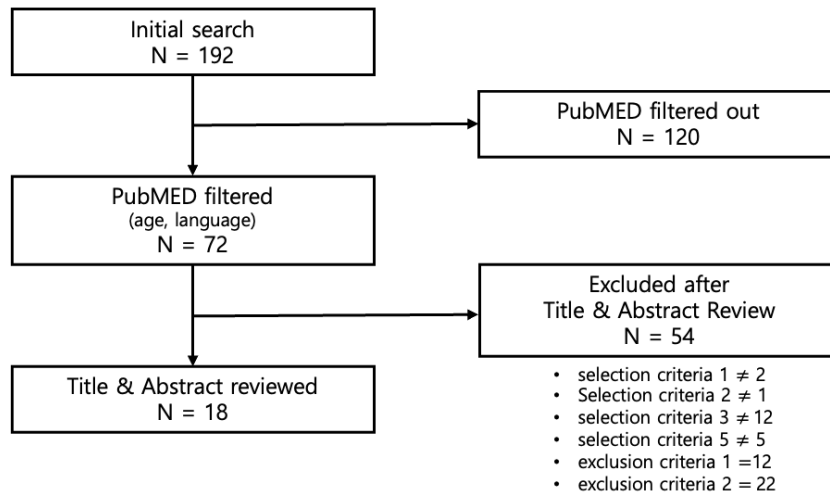


그림 1. 문헌 선택 흐름도(인지기능 장애 - 보행분석)

문헌의 특성은 저자와 출판연도, 연구 설계, 참가자의 수와 연령, 중재와 결과로 구분하여 표 1 에서 제시하였다. 사례 대조군 연구로 설계된 연구들에서는 보행 특성의 뚜렷한 차이를 확인하였다. Yang 등(2024)의 연구에서는 2차원 모션 분석 시스템을 활용하여 8m 걷기 데이터를 분석한 결과, 보행 속도, 케이던스, 활보 길이 변수를 포함하였다[21]. Lowe 등 (2020)의 연구에서는 수동 측정을 통해 23ft 걷기를 평가하였고, 보행 속도와 걸음길이 변수를 포함하였다[22]. 단면 연구에서도 다양한 보행 측정 도구를 활용하여 인지기능 코호트 간의 차이를 평가하였다. Guimarães 등 (2023)은 웨어러블 기기를 사용하여 20m 걷기를 분석하였고, 활보시간, 스윙시간, 스탠스시간, 스윙비율, 스탠스비율 등의 변수를 결과로 포함하였다[23]. Boripuntakul 등 (2022)은 3 차원 모션 분석 시스템을 활용하여 8m 걷기를 평가하며 걸음길이, 걸음너비, 걸음시간, 스윙시간 등의 변수를 다루었다[24]. Yamada 등 (2021) 또한 3 차원 모션 분석 시스템을 사용하여 9m 걷기를 분석하며 보행 속도, 걸음길이, 활보시간에서의 결과를 확인하였다[25]. 특히, 치매 코호트를 포함한 연구들에서 인지기능 저하가 심할수록 보행 변수가 정상인에 비해 불안정하다는 결과를 보여주었다. Bovonsunthonchai 등 (2022)은 2차원 모션 분석 시스템과 압력 분포 매트릭스를 활용하여

발 회전각도, 걸음길이, 보행주기, 스탠스 단계 등을 평가하였고, 정상 코호트, MCI 코호트, 치매 코호트의 변수를 비교하였다[26]. Pau 등 (2020)은 관성 측정 장치(IMU)를 사용하여 30m 걷기를 평가하며, 정상, MCI, 치매 환자에서의 보행 속도, 걸음길이, 케이던스, 스탠스 단계 등에 대해 확인하였다. 마지막으로, 다양한 도구와 테스트를 결합한 연구도 있었다. de Oliveira Silva 등 (2020)은 2 차원 모션 분석 시스템을 통해 10m 걷기와 TUG테스트, 트래드밀 걷기 데이터를 분석하며, 보행 속도, 보행주기, 케이던스, 걸음길이, 활보 길이 등에서 정상과 MCI, 치매 코호트 간 차이를 종합적으로 평가하였다[27]. Goyal 등 (2019)은 압력 분포 매트릭스를 활용하여 6m 걷기 데이터를 분석하며, 보행 속도, 케이던스, 걸음길이, 활보 길이 등에서 MCI 코호트와 정상 코호트의 변수를 비교하였다[28].

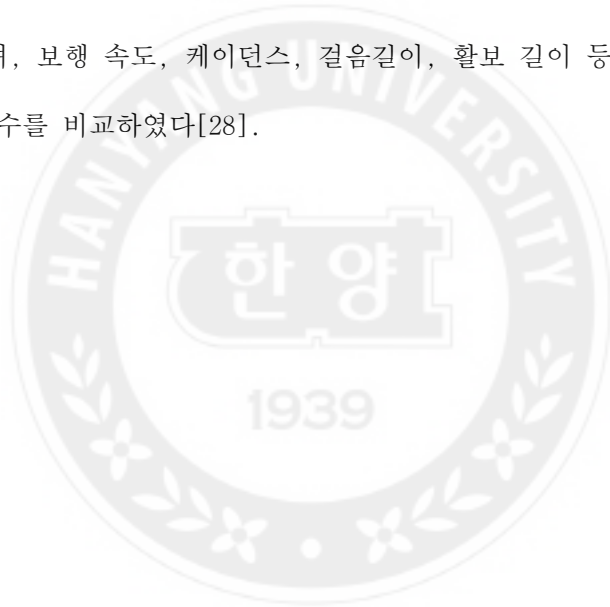


표 1. 메타분석에 포함된 문헌들의 특성(인지기능 장애 - 보행분석)

Author	Study design	Participants (N, Age±SD)			Intervention		Outcome (single task)
		CH	MCI	D	GMT	FA	
Yang, et al. (2024)	case-control Study	62 71.7±5.2	62 74.0±5.4	NA	2D motion analysis system	8m walking	Gait Speed, Cadence, Stride Length,
Guimarães, et al. (2023)	cross- sectional study	13 78.5±9.2	16 83.5±7.1	NA	wearable devices	20m walking	Stride time, Swing time, Stance time, Swing ratio, Stance ratio, etc.
Boripuntakul, et al. (2022)	cross- sectional pilot study	25 68.7±4.7	25 68.6±3.8	NA	3D motion analysis system	8m walking	Step Length, Step width, Step time, Swing Time, etc.
Bovonsunthonchai, et al. (2022)	cross- sectional study	30 63.6±4.8	32 69.9±7.0	31 71.8±9.5	2D motion analysis system	3m Force Distribution Mat	Foot rotation angle, Step length, Stride length, stance phase, etc.
Yamada, et al. (2021)	cross- sectional study	47 72.3±4.2	45 74.1±4.8	26 75.2±7.5	3D motion analysis system	9m walking	Gait speed, step length, stride time, etc.
Pau, et al. (2020)	chart review study	34 79.1±3.4	37 78.8±3.6	19 78.9±3.5	IMU	30m walking	Gait speed, step length, Cadence, stance phase, etc.
de Oliveira Silva, et al. (2020)	cross- sectional study	17 70.6±4.3	23 77.1±5.2	23 78.4±6.1	2D motion analysis system	10m walking TUGT TWT	Velocity, Gait cycle, Cadence, Step length, Stride length
Lowe, et al. (2020)	case-control Study	133 69.3±9.6	119 70.2±9.8	NA	manually	23ft walking	Gait speed, step length
Goyal, et al. (2019)	cross- sectional study	8 73.1±2.2	8 77.9±1.7	NA	Force Distribution Measurement	6m Force Distribution Mat	Velocity, Cadence, Step length, Stride length

CH: Cognitively Healthy, MCI: Mild Cognitive Impairment, D: dementia, GMT: Gait Measurement Tool, FA: Functional Assessment, IMU: inertial measurement, TUGT: Timed Up and Go test, TWT: Treadmill walk test

1. 보행속도

정상 코호트와 MCI 코호트에서의 보행 속도 분석에서 이질성 검정 결과에 따라 랜덤효과 모델로 분석하였다. 랜덤효과모델의 평균차가 0.12(95% CI, 0.05-0.19)로 MCI 코호트에서 정상 코호트와 비교했을 때 유의하게 보행속도에서 느려지는 결과를 보였다(그림 2).

정상 코호트와 치매 코호트에서의 보행 속도 분석에서 이질성이 크지 않아($I^2 = 40\%$, $p\text{-value} = 0.17$) 고정효과모델로 분석하였으며, 평균차가 0.21(95% CI, 0.19-0.23)였다. 치매 코호트에서 유의하게 정상 코호트보다 보행 속도가 느린 결과를 보였다(그림 2).

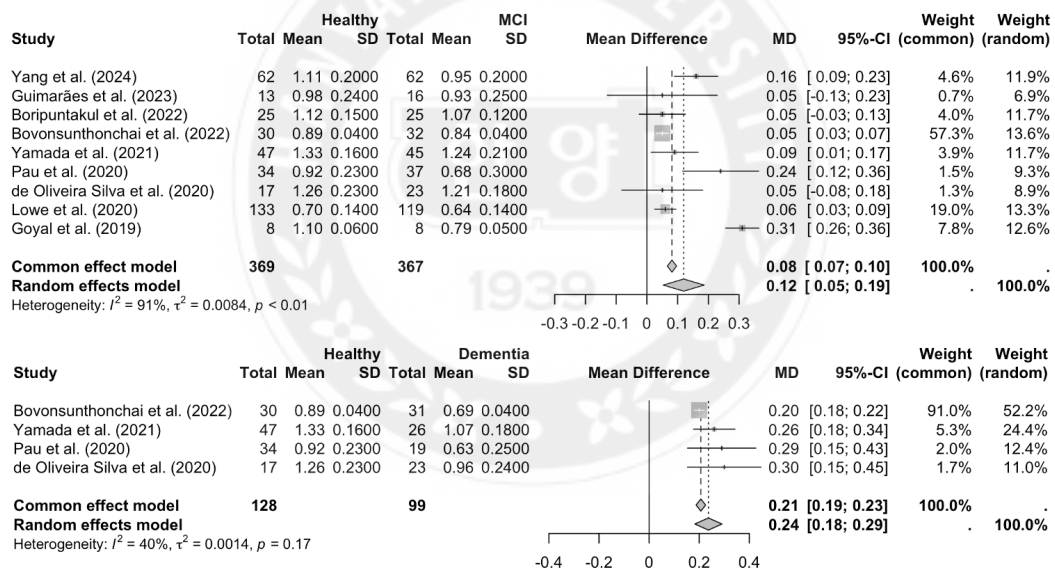


그림 2. 보행 속도에 대한 숲 그림

2. 케이던스

정상 코호트와 MCI 코호트에서의 케이던스를 분석한 메타분석에는 총 3 건의 문헌이 포함되었으며, 이질성이 높게 나타나($I^2 = 94\%$, $p\text{-value} < 0.01$) 랜덤효과 모델을 적용하여 분석하였다. 랜덤효과 모델의 평균 차이가 9.44(95% CI, 1.15-17.73)로 정상 코호트와 비교하여 MCI 코호트의 케이던스가 유의하게 낮다고 할 수

있다(그림 3).

정상 코호트와 치매 코호트는 메타분석에 포함할 수 있는 문헌의 수(k=1)가 적어 분석하지 않았다

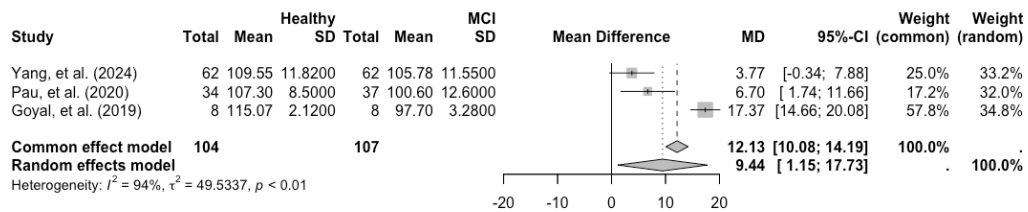


그림 3. 케이던스에 대한 숲 그림

3. 활보 길이

정상 코호트와 MCI 코호트에서의 활보 길이 분석에는 총 5 건의 문헌이 포함되었다. 이질성 검정 결과 유의한 이질성이 확인되어($I^2 = 58\%$, $p\text{-value} = 0.05$) 랜덤효과 모델을 적용하였다. 랜덤효과 모델의 평균 차이는 0.11 (95% CI, 0.07-0.31)로 정상 코호트의 평균과 비교하였을 때 MCI 코호트의 평균 활보 길이가 유의하게 짧았다(그림 4).

정상 코호트와 치매 코호트에서의 활보 길이에 대한 메타분석에는 총 3 건의 문헌이 포함되었다. 유의하게 높은 이질성을 보여($I^2 = 66\%$, $p\text{-value} = 0.05$) 랜덤효과 모델을 적용하였으며, 분석 결과 평균 차이가 0.9(95% CI, 0.09-0.1)로 정상 코호트와 비교하여 치매 코호트의 활보 길이가 유의미하게 짧은 결과를 보였다(그림 4).

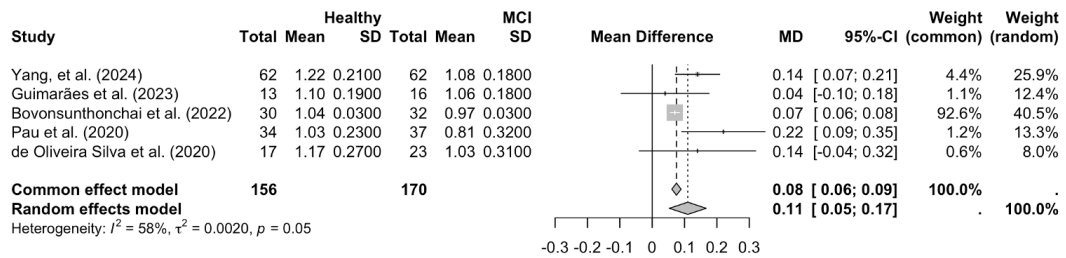


그림 4. 활보 길이에 대한 숲 그림

4. 걸음 길이

정상 코호트와 MCI 코호트에서의 걸음길이에 대한 메타분석에 총 4 건의 문헌이 포함되었다. 분석 결과 유의하게 높은 이질성 검정 결과에 따라($I^2 = 89\%$, $p\text{-value} < 0.01$) 랜덤효과모형을 적용하였으며, 평균차가 0.05 (95% CI, 0.02-0.07)로 정상 코호트와 비교하여 MCI 코호트의 걸음길이가 유의미하게 짧은 결과를 보였다(그림 5).

정상 코호트와 치매 코호트는 메타분석에 포함할 수 있는 문헌의 수($k=2$)가 적어 분석하지 않았다.

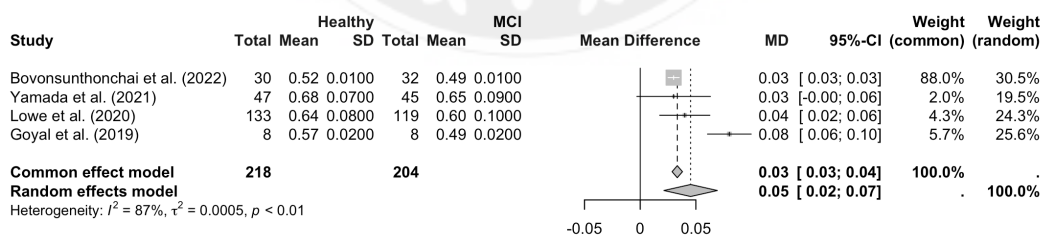


그림 5. 걸음 길이에 대한 숲 그림

5. 보행주기

메타분석에 포함할 수 있는 문헌의 수($k=2$)가 적어 분석하지 않았다.

6. 출판 편향(Publication bias)

각각 보행변수에 대한 메타분석에 포함된 연구들의 출판 편향은 펀넬 플롯(Funnel

plot)으로 시각적으로 표현하였다(보충자료 1).

제2절 보행분석과 낙상

("gait analysis" OR "gait variation" OR "gait variability") AND ("fall" OR "fall risk")으로 검색된 152 건 중 PubMed Filter를 통해 60 건이 1 차 제외되었으며, 2 차로 제목과 초록을 검토하여 81 건을 2 차로 제외하여 28 건이 분류되어 리뷰하였으며, 분석 가능한 보행 변수를 포함하는 최종 2 건의 문헌이 분석에 포함되었다(그림 6).

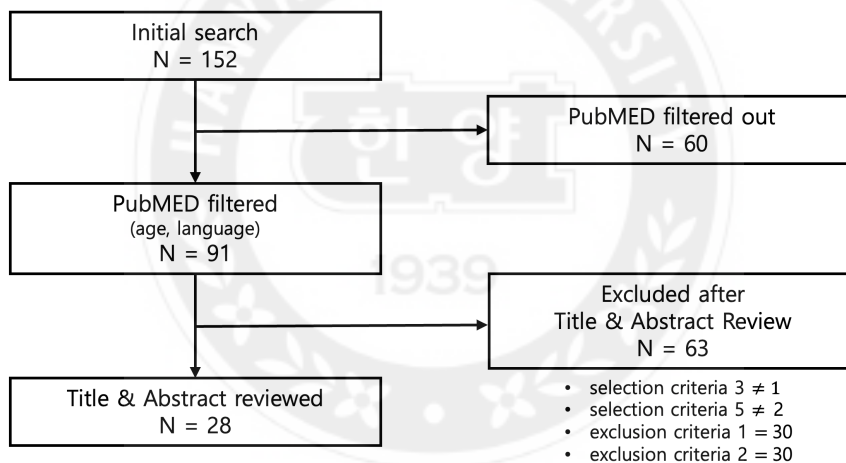


그림 6. 문헌 선택 흐름도(인지기능 장애 - 낙상)

낙상군과 비낙상군의 보행분석을 비교할 수 있는 두건의 문헌의 특성은 저자와 출판연도, 연구 설계, 참가자의 수와 연령, 중재와 결과로 구분하여 표 2 에서 제시하였다. Garcia-Villamil et al. (2021) 의 연구는 사례 대조군 연구로 IMU 를 활용하여 TUG Test 를 통해 낙상군과 비낙상군의 보행 특성을 비교하였다. 분석 결과, 주요 변수로 보행 속도, 케이던스, 활보 길이가 포함되었다. Álvarez et al. (2023) 의 연구의 경우, 단면 연구로 관찰 기반 다기관에서 노인들의 보행 특성을 평가하였으며

낙상군과 비낙상군을 포함하여 IMU를 활용하여 20m 걷기 평가를 수행하였고, 주요 결과 변수로 케이던스, 활보 길이, 보행 속도, 스탠스 단계가 포함되었다.

표 2. 메타분석에 포함된 문헌들의 특성(인지기능 장애 - 낙상)

Authors	Study design	Participants (N, Age±SD)		Interventions		outcomes
		F	N-F	GAT	FA	
García-Villamil et al. (2021)	Cross-sectional case-control study	11 83.7±4.6	10 78.2±3.0	IMU	TUGT	Gait Speed, Cadence, Stride Length
Álvarez et al. (2023)	observational multicenter cohort study	86 84.2±5.5	77 80.9±6.5	IMU	20m walking	Cadence, Stride Length, Walking Speed, Stance Phase

F: Faller, NF: Non-Faller, GMT: Gait Measurement Tool, AT: Analysis Tool), IMU: inertial measurement, FA: functional Assessment, TUGT: Timed Up and Go test

적은 수 (k=2)의 문헌에 대해서 메타분석을 대신하여 낙상군과 비낙상군간의 보행 속도, 케이던스, 활보 길이 세가지의 변수의 효과크기(Effect Size)를 평가하였다.

1. 보행 속도

두 연구의 이질성은 9.7%로 낮아 고정효과 모델로 분석하였으며, 낙상군에서 비낙상군보다 보행 속도가 유의하게 낮은 것으로 나타났으며($p < 0.0001$), 이는 통계적으로 매우 유의미한 차이를 시사한다. 표준화 평균 차이(Standardized mean difference, SMD)는 -1.21 로, 이는 큰 효과크기를 나타내며, 낙상군의 보행 속도가 비낙상군에 비해 상당히 느림을 의미한다(그림 7).

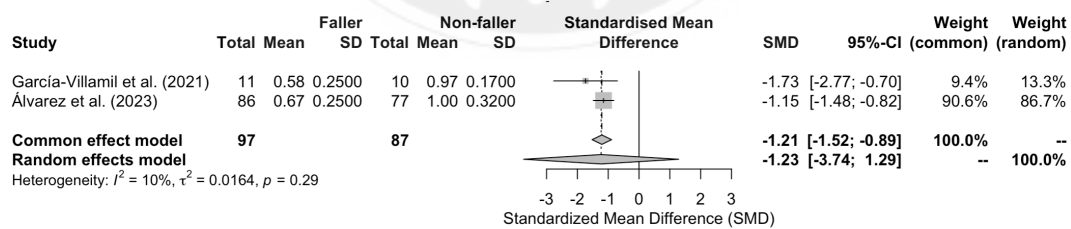


그림 7. 보행 속도 대한 숲 그림(낙상군-비낙상군)

2. 케이던스

두 연구의 이질성은 0.0%로 이질성이 없는 것으로 나타났다. 고정효과 모델을 적용한 분석 결과 낙상군의 케이던스가 비낙상군에 비해 유의하게 낮은 것으로 확인되었다($p < 0.0001$). SMD는 -0.78 로, 이는 중간에서 큰 효과크기(moderate to large

effect size)를 의미하며, 낙상군의 케이던스가 비낙상군보다 유의미하게 낮음을 시사한다(그림 8).

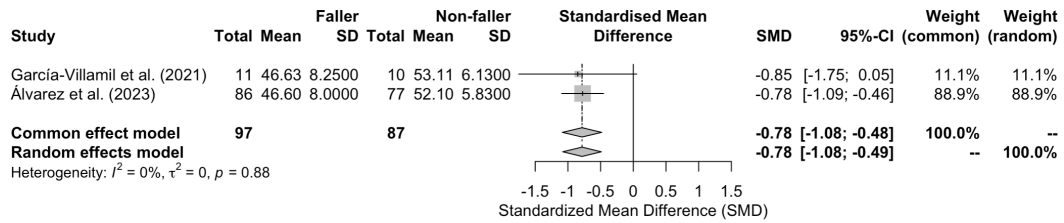


그림 8. 케이던스 대한 숲 그림(낙상군-비낙상군)

3. 활보 길이

두 연구의 이질성은 0.0%로 이질성이 없는 것으로 확인되었다. 고정효과 모델을 적용한 분석 결과 낙상군의 활보 길이가 비낙상군에 비해 유의하게 짧은 것으로 나타났다($p < 0.0001$). SMD는 -1.13 으로 큰 효과크기(large effect size)를 보였으며, 이는 낙상군의 활보 길이가 비낙상군에 비해 상당히 짧다는 것을 의미한다(그림 9).

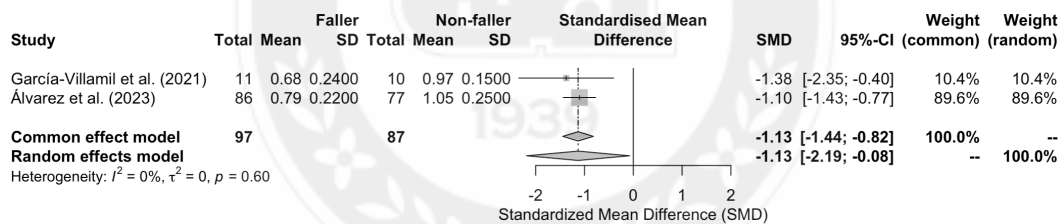


그림 9. 활보 길이에 대한 숲 그림(낙상군-비낙상군)

‘제 1 절 보행분석과 인지기능 장애’에 대한 메타분석 결과 보행 속도, 케이던스, 활보 길이, 걸음길이와 같은 주요 보행변수는 인지기능 장애 코호트(MCI 코호트 및 치매 코호트)과 정상 코호트 간에 유의미한 차이를 보였음을 확인하였다. 특히 인지기능 장애의 정도가 심할 수록 보행변수에서의 저하가 더욱 두드러지게 나타났다. 또한 ‘제 2 절 보행분석과 낙상’에 대한 두가지 문헌을 대상으로 낙상군과 비낙상군 간의 보행 변수 차이에 대한 효과 분석을 시행하였으며, 낙상군에서 보행 속도,

케이던스, 활보 길이가 유의하게 감소한 것으로 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 본 연구는 인지기능 장애와 낙상 간의 보행 변수 연관성을 추가적으로 검증하고자 오픈 데이터셋을 활용하여 분석을 진행하였다. 검증에는 ‘제 1절’ 과 ‘제 2절’ 에서 공통적으로 사용된 보행 변수인 보행 속도, 케이던스, 활보 길이를 중심으로 검토하였다. 이를 통해 보행 분석에서 결과의 저하가 인지기능 장애와 낙상 간의 공통된 특징임을 확인하고자 하였다.

제3절 오픈 데이터셋을 활용한 검증

본 연구에서는 하버드대학교 의과대학에서 제공하는 오픈 데이터 셋인 Mi-WiSH(Mind-Body Wellness in Supportive Housing) Study (ClinicalTrials.gov Identifier NCT02346136) 데이터셋을 이용하였다. 데이터는 2024 년 11 월 5 일 하버드 대학교의 MIDAS 플랫폼에서 다운로드하였다.

1. 데이터 전처리

Mi-WiSH 데이터셋을 다운로드한 후 MMSE 점수가 없는 경우 결측 치로 간주하여 제외하였으며, 총 175 명의 데이터를 분석 대상으로 확보하였다. 데이터는 MMSE 점수를 기준으로 인지기능 정상(24 점 이상), MCI(18 점 이상 24 점 미만), 치매(17 점 미만)의 세 코호트로 분류하였다. 또한, 첫 인터뷰 날짜에 확인한 한달 내 낙상 경험 여부로 기준으로 낙상군(Fall history = 1)와 비낙상군(Fall history = 0)로 구분하였다. 그 결과 낙상군은 총 32 명(인지기능 정상 코호트는 26 명, MCI 코호트는 6 명)이었으며, 비낙상군은 총 143 명(정상 코호트 93 명, MCI 코호트 44 명, 치매 코호트 6 명)이었다. 낙상군에는 치매 환자가 포함되지 않았으므로 이번 분석에는 정상(Cognitively Healthy) 코호트와 MCI 코호트 만을 대상으로 하였다. 한편, 데이터셋 특성을 확인하고자

대상자들의 성별과 연령을 추가로 확보하였다.

2. 통계 분석

통계 분석은 각 보행 변수에 대해 정상 코호트와 MCI 코호트 간의 평균 차이를 비교하기 위해 ANOVA를 활용하였다. ANOVA는 두 코호트 간의 차이를 평가하는 데 적합한 방법으로, 독립변수는 Cognitive Group (Healthy vs. MCI), 종속변수는 보행 변수로 설정하였다. 또한, 낙상 경험을 그룹화 변수로 사용하여 낙상 경험의 유무에 따라 별도의 ANOVA를 수행하였다.

데이터셋에 포함된 대상자들의 성별 비율을 확인하였으며, 각 코호트 별 연령 및 MMSE 점수의 평균값과 표준편차를 계산하였다. 연령 데이터의 경우 원데이터셋에서 89세를 초과하는 값은 '>89' 로 표기되어 있어 불가피하게 해당 데이터의 대상자 수를 따로 표기하였다. 이후 '>89' 데이터를 제외한 연령의 평균값 및 표준편차를 구하여 별도로 표기하였다.

본 검증은 탐색적 평가의 성격을 가지므로 유의수준을 0.1로 설정하여 잠재적인 관계를 평가하고자 하였다. ANOVA 결과의 직관적 이해를 돕기 위해 박스 플롯(Box Plot)을 생성하여 각 보행 변수에 대한 정상 코호트와 MCI 코호트 간의 차이를 시각적으로 표현하였다. 박스 플롯에는 ANOVA 결과의 p-value 를 함께 표시하여 코호트 간 차이의 통계적 유의성을 한눈에 확인할 수 있도록 하였다.

3. 분석 결과

분석에 포함된 169 명의 대상자들의 특성은 표 3에서 제시하고 있으며 ANOVA 결과는 보충자료 3에서 제시하고 있다. 표 3에서는 낙상군과 비낙상군 모두에서 인지기능 정상 코호트와 MCI 코호트의 성별, 연령, MMSE 점수를 비교하였다.

낙상군 중 정상 코호트에서는 남성 비율이 3 0.8%(8 명), MCI 코호트에서는 33.3%(2 명)로 나타났으며, 비낙상군 중 정상 코호트는 39.8%(37 명), MCI 코호트는 20.5%(9 명)로 나타났다. 연령의 경우 89 세 초과 대상자는 낙상군 중 정상 코호트 2 명,

비낙상군 중 정상 코호트 8명, MCI 코호트 3명으로 확인되었다. 89세 초과를 제외한 평균 연령은 낙상군 정상 코호트에서 71.75±7.78세, MCI 코호트에서 84.00±4.94세로 나타났다. 비낙상군은 정상 코호트 72.56±7.24세, MCI 코호트 74.05±7.09세였다. MMSE 평균 점수는 낙상군 정상 코호트 26.65±1.60, MCI 코호트 21.33±1.97, 비낙상군 정상 코호트 27.00±1.74, MCI 코호트 20.93±1.86으로 확인되었다. 전반적인 대상자의 특성은 MCI 코호트에서 연령이 더 높고 MMSE 점수가 더 낮은 경향으로 관찰되었다(표 3).

표 3. 검증 데이터 셋의 그룹별 특성

	Faller		Non-Faller	
	Healthy	MCI	Healthy	MCI
Gender	M 8(30.8%)	M:2(33.3%)	M:37(39.8%)	M:9(20.5%)
>89(N)	2	0	8	3
Age				
Mean±SD (excluded age >89)	71.75±7.78	84.00±4.94	72.56±7.24	74.05±7.09
MMSE(Mean±SD)	26.65±1.60	21.33±1.97	27.00±1.74	20.93±1.86

보행 속도는 특히 낙상군에서는 정상 코호트와 MCI 코호트간 통계적으로 유의미한 차이가 관찰되었으며($p = 0.000308$), 이는 보행 속도가 인지기능 저하를 민감하게 반영하는 변수임을 보여준다. 낙상군에서 MCI 코호트는 정상 코호트에 비해 보행 속도가 현저히 감소하는 경향을 보였다(그림 10.A). 비낙상군에서는 정상 코호트와 MCI 코호트간 보행 속도에서도 유의미한 차이가 나타났으나($p = 0.0199$), 낙상군에 비해 차이가 덜 두드러졌다(그림 10.B). 이는 비낙상군에서는 보행 속도의 차이가 상대적으로 완화될 수 있음을 시사한다. 보행 속도가 낙상군에서 더 뚜렷한 차이를 보인 점은 보행 속도가 인지기능 저하와 낙상 위험 간의 상호작용을 민감하게 반영할 수 있는 핵심 지표임을 의미한다.

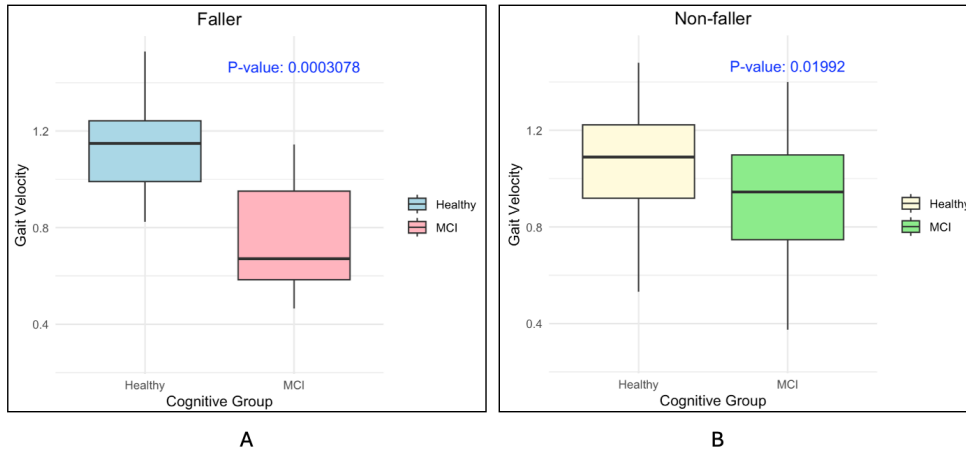
케이던스 또한 낙상군에서 코호트간 유의미한 차이가 확인되었으며($p = 0.00843$), 이는 케이던스가 낙상 경험과 인지기능 저하의 상호작용을 민감하게 반영할 수 있음을

나타낸다. 특히, MCI 코호트의 케이던스는 정상 코호트에 비해 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타났다(그림 10.C). 비낙상군에서는 정상 코호트와 MCI 코호트 간 차이가 통계적으로 유의하지 않았으며($p = 0.131$), 이는 비낙상군의 경우 케이던스가 인지기능 저하를 반영하지 않을 가능성을 시사한다(그림 10.D).

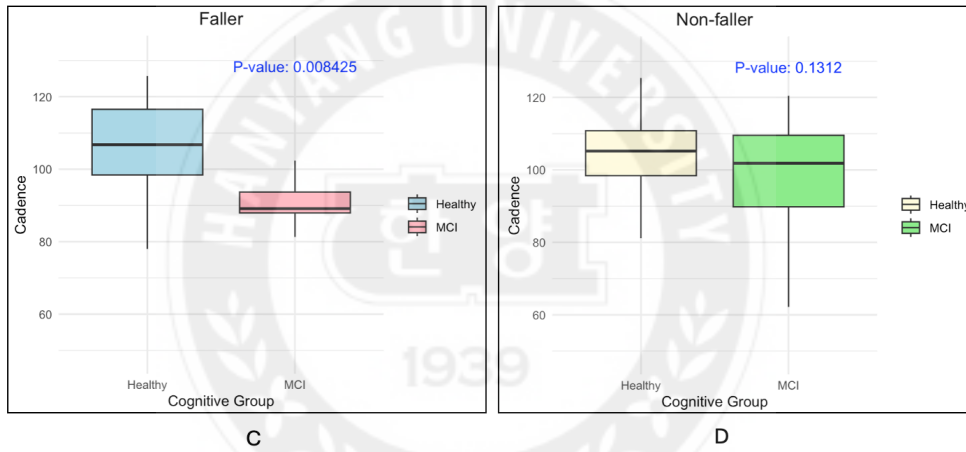
활보 길이는 낙상군에서 정상 코호트와 MCI 코호트 간의 차이가 매우 유의미하게 나타났으며($p = 0.00368$), 낙상군에서 MCI 코호트의 활보 길이가 정상 코호트보다 현저히 짧았다(그림 10.E). 이는 낙상군의 인지기능 저하가 활보 길이 감소와 밀접한 연관이 있음을 보여준다. 비낙상군에서는 정상 코호트와 MCI 코호트 간의 활보 길이에서도 유의미한 차이가 나타났으나($p = 0.0418$), 낙상군에 비해 효과 크기가 작았다(그림 10.F). 이는 활보 길이가 낙상군에서 인지기능 저하를 더 명확히 반영하는 것을 의미한다.

오픈 데이터셋을 활용한 분석을 통해 보행 속도, 케이던스, 활보 길이와 같은 보행 변수들이 인지기능 저하와 낙상 위험 간의 상호작용을 민감하게 반영할 수 있는 주요 지표임을 확인하였다. 구체적으로, 보행 속도는 정상 코호트와 MCI 코호트, 그리고 낙상 여부에 따라 유의미한 차이를 보였으며, 이는 보행 속도가 인지기능 저하의 초기 단계에서 민감하게 반응하는 변수임을 시사한다. 또한, 활보 길이는 낙상 경험 여부와 인지기능 상태를 모두 반영하며, 특히 낙상군에서 정상 코호트와 MCI 코호트 간의 차이가 뚜렷하게 나타나, 낙상 위험을 평가하는 데 있어 주요 지표로 활용될 가능성을 보여준다. 한편, 케이던스는 낙상군에서만 유의미한 차이를 보임으로써, 낙상 경험과 인지기능 저하 간의 상호작용을 반영하는 특이적인 역할을 수행함을 확인하였다.

Gait Velocity



Cadence



Stride Length

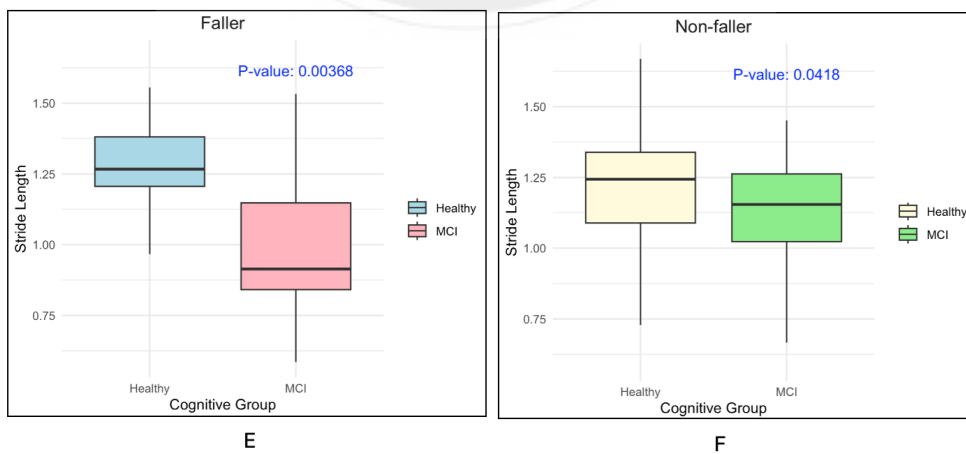


그림 10. 보행 변수에 대한 검증 결과 비교 박스 플롯

제4장 논의

본 연구는 ‘보행분석과 인지기능 장애’, ‘보행분석과 낙상’이라는 주제로 체계적 문헌고찰 및 메타분석을 시행하여 인지기능 장애 노인의 낙상에 영향을 미치는 주요 보행 변수를 확인하고 검증하고자 하였다.

인지기능 장애와 보행분석 간의 메타분석 결과와 낙상과 보행분석 간의 효과크기 분석 결과를 비교해보면, 인지기능이 저하된 노인들은 보행 속도, 케이던스, 활보 길이 등 여러 보행변수에서 유의한 감소를 보였으며, 이는 낙상 위험이 높은 노인들과 유사한 패턴을 보인다. 특히, 보행 속도와 케이던스, 활보 길이의 감소는 인지기능 장애와 낙상 위험을 예측하는 데 있어 중요한 지표로 활용될 수 있다. 이는 세 변수가 모두 뇌의 인지기능과 운동기능의 통합을 필요로 하는 복잡한 활동이기 때문이다[13], [29].

메타분석 및 효과크기 분석 결과를 활용하여 오픈소스 데이터셋으로 검증한 결과를 살펴보면, 낙상군에서 보행 속도와 활보 길이의 차이가 비낙상군과 비교하여 매우 유의미하게 나타났으며, 이는 두 변수가 낙상 위험도와 인지기능 저하를 평가하는 핵심 지표로 활용될 수 있음을 보여준다. 또한, 낙상군에서만 케이던스에서 유의미한 차이가 관찰된 점은 인지기능 저하에서 보행 리듬에 낙상에 미치는 영향을 강조하며, 이를 통해 낙상 위험도를 예측 가능성을 시사한다.

이와 같은 결과는 실제 임상 및 지역사회 환경에서의 적용 가능성을 높인다. 특히, 최근 보행 분석을 통해 낙상 위험을 조기에 감지하고자 센서와 같은 간단한 장비를 활용한 다양한 연구가 진행되고 있다[30][31]. 이러한 간단한 방법을 활용한 낙상의 위험도 측정은 노인 대상의 건강관리 및 재활 서비스를 한층 발전시키는데 도움을 줄 수 있을 것이다. 예를 들어, 가정이나 커뮤니티 센터에서 웨어러블 기기 또는 IMU 등의

장비를 활용하여 실시간으로 보행 데이터를 수집하고, 이를 기반으로 개인화된 피드백과 낙상 예방 전략을 제공하는 프로그램 개발로 이어질 수 있다.

최근 연구들은 보행 분석의 임상적 유용성을 지속적으로 입증하고 있다. 예컨대, 웨어러블 기기를 활용한 연구에서는 보행 속도와 보폭 길이가 인지기능 저하와 낙상 위험을 조기에 예측할 수 있는 유용한 변수임을 확인하였다. 또한, 보행 리듬과 같은 세부적인 변수는 낙상 위험을 더 정교하게 평가할 수 있는 가능성을 제시한다. 이러한 결과는 보행 분석이 단순한 활동 평가를 넘어 예방적 건강관리의 핵심 도구로 활용될 수 있음을 보여준다.

그러나 본 연구는 몇 가지 한계를 지니고 있다. 데이터셋의 성비와 그룹별 대상자 수가 균일하지 않아 결과 해석에 있어 편향 가능성이 존재하며, 치매 코호트에 대한 분석이 이루어지지 않은 점, 낙상 경험에 대한 조사가 비교적 짧은 기간(1개월)으로 이루어진 점 등은 추가적인 연구가 필요함을 시사한다. 이를 해결하기 위해서는 장기간의 코호트 연구를 통해 보행 특성과 낙상 위험, 그리고 인지기능 변화 간의 관계를 종합적으로 분석하는 것이 중요하다. 또한, 웨어러블 기기를 사용한 장기 모니터링 연구를 통해 환경적 요인과 보행 특성 간의 연관성을 추가로 탐색하는 것도 필요하다.

향후 연구에서는 다양한 환경과 조건에서 보행 변수를 측정하고, 이를 통해 보다 정밀한 낙상 위험 예측 모델을 개발할 필요가 있다. 특히, 기계학습 및 인공지능 기술을 활용해 대규모 보행 데이터를 분석함으로써, 낙상 예방 및 조기 진단을 위한 실용적인 솔루션을 제시할 수 있을 것이다. 이를 통해 노인 대상의 건강관리 패러다임을 더욱 혁신적으로 변화시키는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

제5장 결론

본 연구는 인지기능 장애 노인의 낙상 위험을 평가하는 데 있어 보행 분석의 활용 가능성을 체계적으로 검토하고, 이를 메타분석과 데이터 검증을 통해 확인하고자 하였다. 연구 결과, 보행 속도, 활보 길이, 케이던스와 같은 주요 보행 변수는 인지기능 장애 코호트(MCI 코호트 및 치매 코호트)과 정상 코호트, 그리고 낙상군과 비낙상군 사이에서 뚜렷한 차이를 보였다. 특히, 보행 속도는 낙상 여부와 인지기능 상태를 민감하게 반영하는 핵심 지표로 나타났으며, 활보 길이는 낙상 위험을 객관적으로 평가할 수 있는 신뢰도 높은 변수로 확인되었다. 케이던스는 낙상군에서 특히 유의미한 차이를 보이며, 낙상 경험과 인지기능 저하 간의 상호작용을 잘 반영하는 변수임을 시사하였다.

또한, 본 연구는 오픈 데이터셋을 활용한 검증을 통해 보행 분석 결과의 신뢰성을 높였으며, 보행 분석이 단순히 낙상 위험을 평가하는 도구를 넘어, 인지기능 저하의 초기 신호를 포착하는 데도 유용할 수 있음을 입증하였다. 이는 실제 임상 현장에서 간단한 센서를 활용한 보행 분석 도구가 노인들의 낙상 예방과 건강 관리에 실질적으로 기여할 수 있음을 의미한다.

그러나 이번 연구는 몇 가지 한계를 가진다. 치매 코호트에 대한 분석이 충분히 이루어지지 않았고, 낙상 데이터가 비교적 짧은 기간을 기준으로 수집된 점이 있다. 또한, 데이터의 성비와 그룹 간 대상자 수의 불균형도 결과 해석에 영향을 미쳤을 가능성이 있다. 향후 연구에서는 장기간의 관찰 연구와 다양한 환경에서의 데이터를 활용해 보행 변수와 낙상 위험, 그리고 인지기능 변화 간의 관계를 보다 종합적으로 분석할 필요가 있다.

결론적으로, 본 연구는 보행 분석이 인지기능 저하와 낙상 위험을 평가하는 유용한 도구임을 확인하였다. 앞으로는 기계학습이나 인공지능 기술을 활용한 대규모 데이터 분석을 통해 보다 정밀한 낙상 위험 예측 모델을 개발하고, 이를 바탕으로 노인들의 건강 관리와 재활 전략을 더욱 발전시킬 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Statistics Korea, “2023 Population and Housing Census Report,” Available: https://kostat.go.kr/board.es?act=view&bid=10820&list_no=427252&mainXml=Y&mid=a10301010000. [Accessed: Dec. 5, 2024].
- [2] W. X. Song *et al.*, “Evidence from a meta-analysis and systematic review reveals the global prevalence of mild cognitive impairment,” 2023, *Frontiers Media SA*. doi: 10.3389/fnagi.2023.1227112.
- [3] World Health Organization, *Global action plan on the public health response to dementia 2017-2025*. 2017. Accessed: Sep. 26, 2024. [Online]. Available: <https://www.who.int/publications/i/item/global-action-plan-on-the-public-health-response-to-dementia-2017---2025>
- [4] R. C. Petersen, G. E. Smith, S. C. Waring, R. J. Ivnik, E. G. Tangalos, and E. Kokmen, “Mild Cognitive Impairment: Clinical Characterization and Outcome,” *Arch Neurol*, vol. 56, no. 3, pp. 303-308, Mar. 1999, doi: 10.1001/ARCHNEUR.56.3.303.
- [5] S. Belleville, H. Chertkow, and S. Gauthier, “Working memory and control of attention in persons with Alzheimer’s disease and mild cognitive impairment,” *Neuropsychology*, vol. 21, no. 4, pp. 458-469, Jul. 2007, doi: 10.1037/0894-4105.21.4.458.
- [6] M. Husain and J. M. Schott, “Oxford Textbook of Cognitive Neurology and Dementia.”
- [7] M. F. Folstein, S. E. Folstein, and P. R. McHugh, “ ‘Mini-mental state’ . A practical method for grading the cognitive state of patients for the

- clinician,” *J Psychiatr Res*, vol. 12, no. 3, pp. 189-198, 1975, doi: 10.1016/0022-3956(75)90026-6.
- [8] T. N. Tombaugh and N. J. McIntyre, “The mini-mental state examination: a comprehensive review,” *J Am Geriatr Soc*, vol. 40, no. 9, pp. 922-935, 1992, doi: 10.1111/J.1532-5415.1992.TB01992.X.
- [9] Z. S. Nasreddine *et al.*, “The Montreal Cognitive Assessment, MoCA: a brief screening tool for mild cognitive impairment,” *J Am Geriatr Soc*, vol. 53, no. 4, pp. 695-699, 2005, doi: 10.1111/J.1532-5415.2005.53221.X.
- [10] S. Freitas, M. R. Simões, L. Alves, and I. Santana, “Montreal cognitive assessment: validation study for mild cognitive impairment and Alzheimer disease,” *Alzheimer Dis Assoc Disord*, vol. 27, no. 1, pp. 37-43, Jan. 2013, doi: 10.1097/WAD.0B013E3182420BFE.
- [11] World Health Organization, “Falls.” Accessed: Sep. 26, 2024. [Online]. Available: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/falls>
- [12] V. Strini, R. Schiavolin, and A. Prendin, “Fall Risk Assessment Scales: A Systematic Literature Review,” *Nurs Rep*, vol. 11, no. 2, p. 430, Jun. 2021, doi: 10.3390/NURSREP11020041.
- [13] M. Montero-Odasso, J. Verghese, O. Beauchet, and J. M. Hausdorff, “Gait and Cognition: A Complementary Approach to Understanding Brain Function and the Risk of Falling,” *J Am Geriatr Soc*, vol. 60, no. 11, p. 2127, Nov. 2012, doi: 10.1111/J.1532-5415.2012.04209.X.
- [14] K. Minta, G. Colombo, W. R. Taylor, and V. R. Schinazi, “Differences in fall-related characteristics across cognitive disorders,” 2023, *Frontiers Media SA*. doi: 10.3389/fnagi.2023.1171306.

- [15] S. W. Muir, K. Gopaul, and M. M. Montero Odasso, "The role of cognitive impairment in fall risk among older adults: A systematic review and meta-analysis," May 2012. doi: 10.1093/ageing/afs012.
- [16] J. H. Hollman, E. M. McDade, and R. C. Petersen, "Normative spatiotemporal gait parameters in older adults," *Gait Posture*, vol. 34, no. 1, pp. 111-118, May 2011, doi: 10.1016/J.GAITPOST.2011.03.024.
- [17] J. Verghese, R. Holtzer, R. B. Lipton, and C. Wang, "Quantitative gait markers and incident fall risk in older adults," *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, vol. 64, no. 8, pp. 896-901, Aug. 2009, doi: 10.1093/GERONA/GLP033.
- [18] J. M. Hausdorff, D. A. Rios, and H. K. Edelberg, "Gait variability and fall risk in community-living older adults: a 1-year prospective study," *Arch Phys Med Rehabil*, vol. 82, no. 8, pp. 1050-1056, 2001, doi: 10.1053/APMR.2001.24893.
- [19] "RISMA 2020 Korean Checklist. Available from: <https://www.equator-network.org/reporting-guidelines/prisma/>."
- [20] C. K. L. Lo, D. Mertz, and M. Loeb, "Newcastle-Ottawa Scale: comparing reviewers' to authors' assessments," *BMC Med Res Methodol*, vol. 14, no. 1, Apr. 2014, doi: 10.1186/1471-2288-14-45.
- [21] M. Yang *et al.*, "Development and External Validation of a Gait Test Based Diagnostic Model for Detecting Mild Cognitive Impairment," *Arch Phys Med Rehabil*, vol. 105, no. 5, pp. 930-938, May 2024, doi: 10.1016/J.APMR.2023.12.008.
- [22] D. A. Lowe, R. K. MacAulay, D. M. Szeles, N. J. Milano, and M. T. Wagner, "Dual-Task Gait Assessment in a Clinical Sample: Implications for Improved

- Detection of Mild Cognitive Impairment,” *J Gerontol B Psychol Sci Soc Sci*, vol. 75, no. 7, pp. 1372-1381, Sep. 2020, doi: 10.1093/GERONB/GBZ119.
- [23] V. Guimarães, I. Sousa, E. D. de Bruin, J. Pais, and M. V. Correia, “Minding your steps: a cross-sectional pilot study using foot-worn inertial sensors and dual-task gait analysis to assess the cognitive status of older adults with mobility limitations,” *BMC Geriatr*, vol. 23, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.1186/S12877-023-04042-6.
- [24] S. Boripuntakul, T. Kamnardsiri, S. R. Lord, S. Maiarin, P. Worakul, and S. Sungkarat, “Gait variability during abrupt slow and fast speed transitions in older adults with mild cognitive impairment,” *PLoS One*, vol. 17, no. 10, Oct. 2022, doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0276658.
- [25] Y. Yamada *et al.*, “Combining Multimodal Behavioral Data of Gait, Speech, and Drawing for Classification of Alzheimer’s Disease and Mild Cognitive Impairment,” *J Alzheimers Dis*, vol. 84, no. 1, pp. 315-327, 2021, doi: 10.3233/JAD-210684.
- [26] S. Bovonsunthonchai, R. Vachalathiti, V. Hiengkaew, M. S. Bryant, J. Richards, and V. Senanarong, “Quantitative gait analysis in mild cognitive impairment, dementia, and cognitively intact individuals: a cross-sectional case-control study,” *BMC Geriatr*, vol. 22, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1186/s12877-022-03405-9.
- [27] F. de Oliveira Silva *et al.*, “Gait analysis with videogrammetry can differentiate healthy elderly, mild cognitive impairment, and Alzheimer’s disease: A cross-sectional study,” *Exp Gerontol*, vol. 131, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.EXGER.2019.110816.

- [28] N. Goyal, G. Luna, E. Curuk, and A. S. Aruin, "Role of motor and cognitive tasks in gait of individuals with mild cognitive impairment," *Int J Rehabil Res*, vol. 42, no. 2, pp. 174-179, 2019, doi: 10.1097/MRR.0000000000000341.
- [29] A. Mirelman *et al.*, "Executive Function and Falls in Older Adults: New Findings from a Five-Year Prospective Study Link Fall Risk to Cognition," *PLoS One*, vol. 7, no. 6, p. e40297, Jun. 2012, doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0040297.
- [30] S. Garcia-de-Villa *et al.*, "Validation of an IMU-based Gait Analysis Method for Assessment of Fall Risk Against Traditional Methods," *IEEE J Biomed Health Inform*, vol. PP, 2024, doi: 10.1109/JBHI.2024.3434973.
- [31] V. Bucinkas *et al.*, "Wearable feet pressure sensor for human gait and falling diagnosis," *Sensors*, vol. 21, no. 15, Aug. 2021, doi: 10.3390/S21155240/S1.

보충 자료

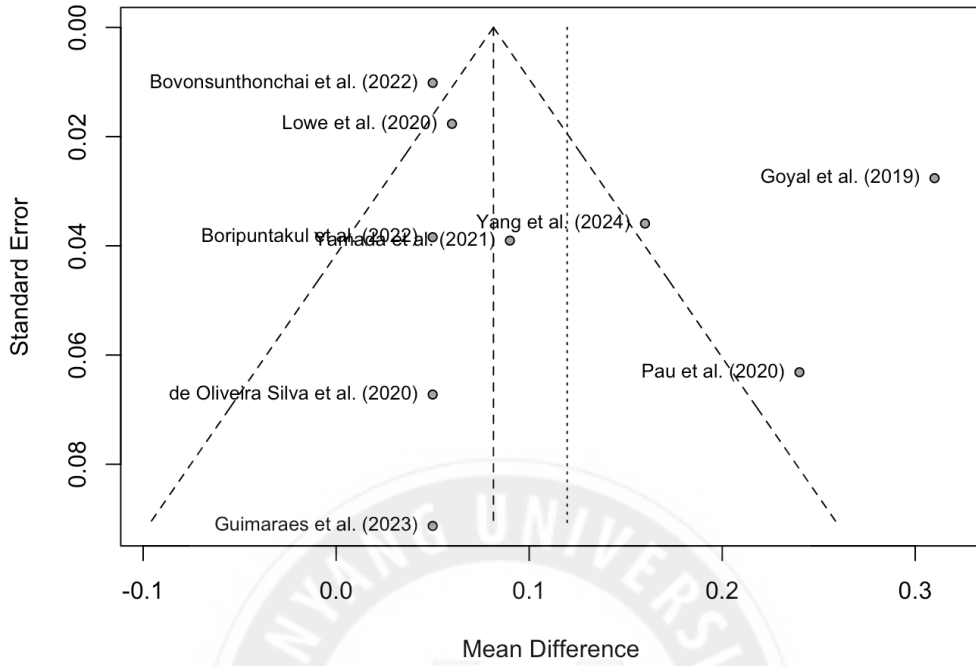
보충자료 1. 문헌의 질 평가

No.	Title (Gait Analysis-Cognitive Disorder)	NOS
1	Yang et al. (2024). Development and External Validation of a Gait Test Based Diagnostic Model for Detecting Mild Cognitive Impairment. <i>Archives of physical medicine and rehabilitation</i> , 105(5), 930-938. https://doi.org/10.1016/j.apmr.2023.12.008	7
2	Guimarães et al. (2023). Minding your steps: a cross-sectional pilot study using foot-worn inertial sensors and dual-task gait analysis to assess the cognitive status of older adults with mobility limitations. <i>BMC geriatrics</i> , 23(1), 329. https://doi.org/10.1186/s12877-023-04042-6	7
3	Boripuntakul et al. (2022). Gait variability during abrupt slow and fast speed transitions in older adults with mild cognitive impairment. <i>PloS one</i> , 17(10), e0276658. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0276658	7
4	Bovonsunthonchai et al. (2022). Quantitative gait analysis in mild cognitive impairment, dementia, and cognitively intact individuals: a cross-sectional case-control study. <i>BMC geriatrics</i> , 22(1), 767. https://doi.org/10.1186/s12877-022-03405-9	7
5	Yamada et al. (2021). Combining Multimodal Behavioral Data of Gait, Speech, and Drawing for Classification of Alzheimer's Disease and Mild Cognitive Impairment. <i>Journal of Alzheimer's disease : JAD</i> , 84(1), 315-327. https://doi.org/10.3233/JAD-210684	7
6	Pau et al. (2020). Smoothness of Gait in Healthy and Cognitively Impaired Individuals: A Study on Italian Elderly Using Wearable Inertial Sensor. <i>Sensors (Basel, Switzerland)</i> , 20(12), 3577.	7

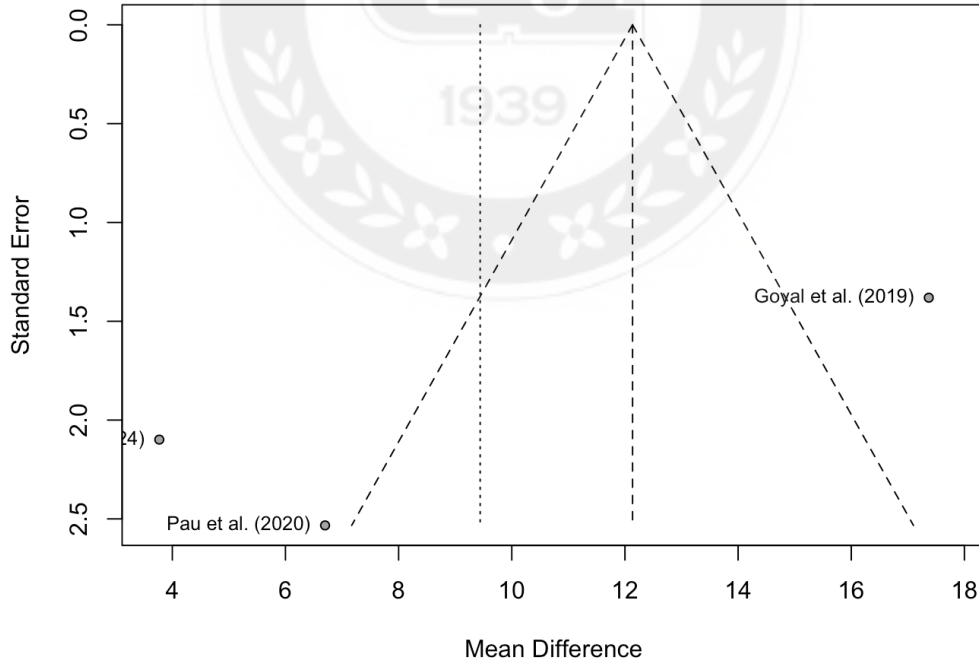
	https://doi.org/10.3390/s20123577	
7	de Oliveira Silva et al. (2020). Gait analysis with videogrammetry can differentiate healthy elderly, mild cognitive impairment, and Alzheimer's disease: A cross-sectional study. <i>Experimental gerontology</i> , 131, 110816. https://doi.org/10.1016/j.exger.2019.110816	7
8	Lowe et al. (2020). Dual-Task Gait Assessment in a Clinical Sample: Implications for Improved Detection of Mild Cognitive Impairment. <i>The journals of gerontology. Series B, Psychological sciences and social sciences</i> , 75(7), 1372-1381. https://doi.org/10.1093/geronb/gbz119	7
9	Goyal et al (2019). Role of motor and cognitive tasks in gait of individuals with mild cognitive impairment. <i>International journal of rehabilitation research. Internationale Zeitschrift fur Rehabilitationsforschung. Revue internationale de recherches de readaptation</i> , 42(2), 174-179. https://doi.org/10.1097/MRR.0000000000000341	7

No.	Title (Gait Analysis-Fall)	NOS
1	García-Villamil et al. (2021). A Pilot Study to Validate a Wearable Inertial Sensor for Gait Assessment in Older Adults with Falls. <i>Sensors (Basel, Switzerland)</i> , 21(13), 4334. https://doi.org/10.3390/s21134334	8
19	Álvarez et al. (2023). Predictors of fall risk in older adults using the G-STRIDE inertial sensor: an observational multicenter case-control study. <i>BMC geriatrics</i> , 23(1), 737. https://doi.org/10.1186/s12877-023-04379-y	9

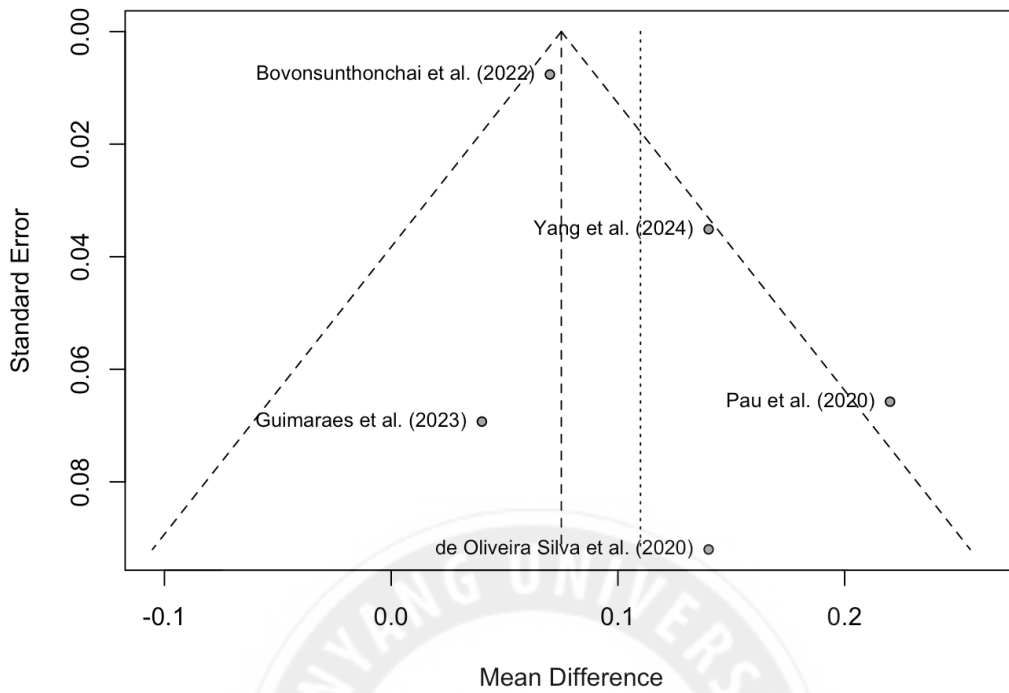
보충자료 2. '보행 분석 - 인지기능 장애' 메타분석의 출판편향



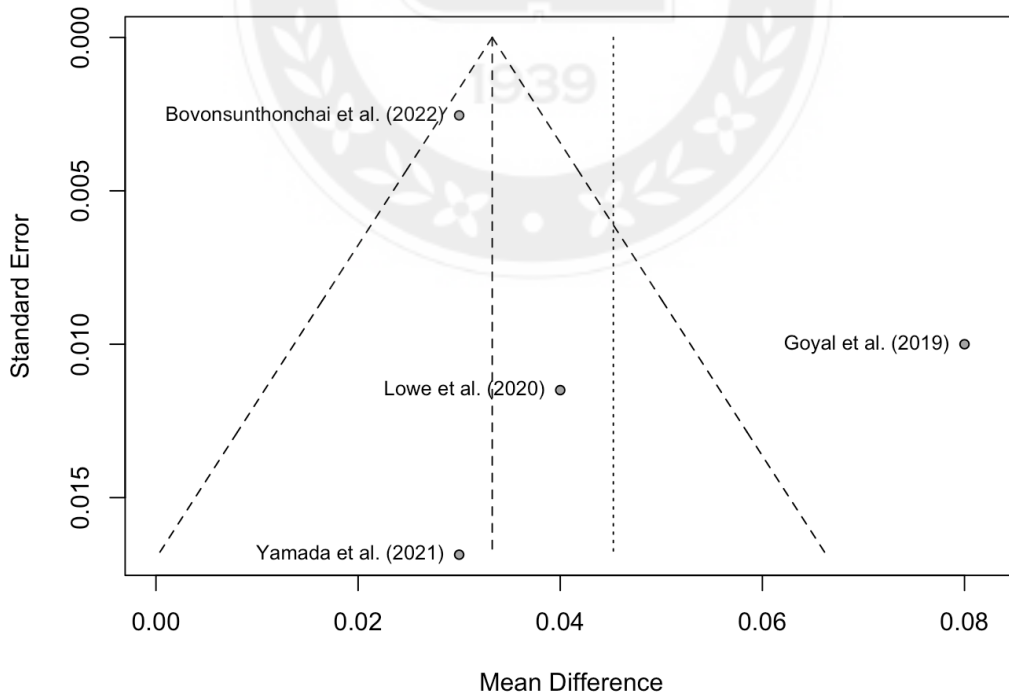
2.A. 보행속도 메타분석에 포함된 문헌의 출판편향



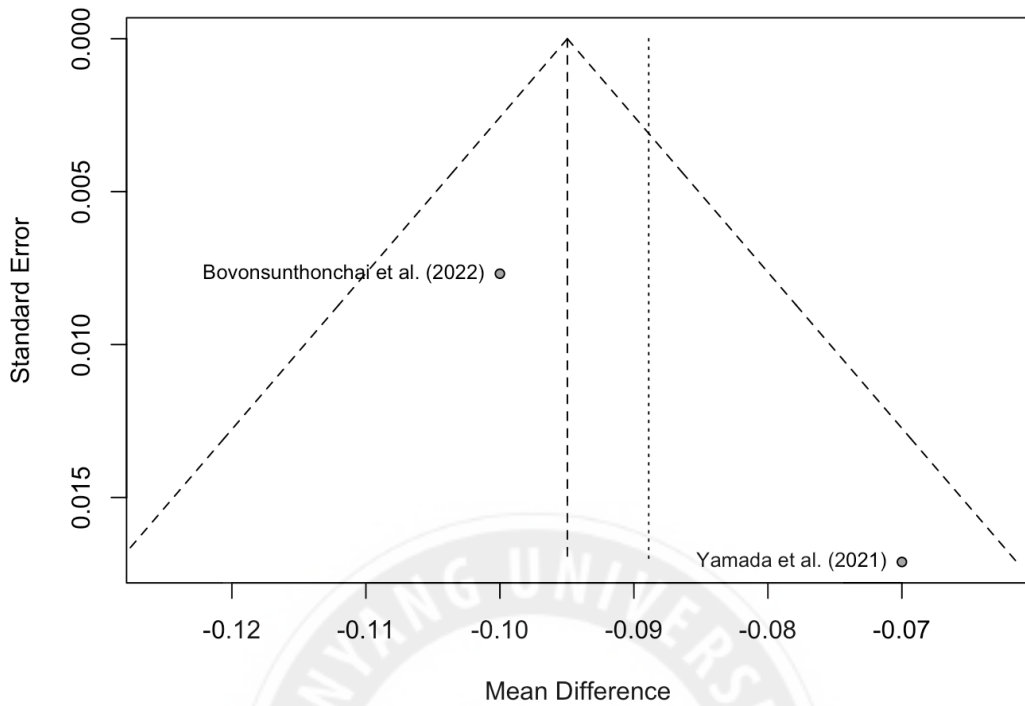
2.B. 케이던스 메타분석에 포함된 문헌의 출판편향



2.C. 활보 길이 메타분석에 포함된 문헌의 출판편향



2.D. 걸음길이 메타분석에 포함된 문헌의 출판편향



2.E. 보행 주기 메타분석에 포함된 문헌의 출판편향

보충자료3 . 오픈데이터셋을 활용한 검증의 ANOVA 결과

Parameters	Category	Df	Sum Sq	Mean Sq	F-value	p-value
Velocity	Faller	1	0.3771	0.3771	9.924	0.00368
	Non-faller	1	0.173	0.1732	4.223	0.0418
Cadence	Faller	1	0.6527	0.6527	16.63	0.000308
	Non-faller	1	0.349	0.3492	5.55	0.0199
Stride Length	Faller	1	1118.0	1118.0	7.954	0.00843
	Non-faller	1	501.0	501.0	2.307	0.131

ABSTRACT

Fall Risk Assessment in Elderly with Cognitive Disorder Using Gait Analysis: Systemic Review and Meta Analysis

Yoo, Ah-Hyun

Dept. of Medical and Digital Engineering

Graduate School of

Hanyang University

This systematic review and meta-analysis evaluated key gait variables for assessing fall risk in older adults with cognitive impairment. Cognitive impairment is associated with declines in gait ability and an increased risk of falls, underscoring the importance of quantitative assessment tools.

This systematic review employing gait analysis to investigate the relationship between cognitive impairment and falls, published over the past decade, revealed notable discrepancies between cognitively impaired cohorts (i.e., MCI and dementia) and control groups in key gait variables, including gait speed, cadence, and stride length. Gait speed was identified as a sensitive indicator of cognitive decline at an early stage, while cadence and stride length were also identified as key predictors of the interaction between fall risk and cognitive decline.

Moreover, the findings were validated using an open dataset, which revealed significant reductions in gait speed, cadence, and stride length in the falls group compared to the

healthy group, supporting the clinical significance and practical applicability of these gait variables.

This study demonstrates the feasibility of using gait analysis to assess and predict fall risk in cognitively impaired older adults, potentially contributing to the development of personalized fall prevention strategies and gait monitoring programs. Furthermore, it provides a foundation for integrating gait analysis results into clinical practice and lays the groundwork for future development of sophisticated fall risk prediction models utilizing wearable devices and artificial intelligence technologies.



감사의 글

학위논문을 마무리하며, 지금까지의 여정에 도움을 주신 모든 분들께 진심으로 감사의 말씀을 드립니다. 디지털의료융합학과 석사 과정은 저에게 새로운 도전이자 큰 배움의 시간이었습니다. 학부에서 간호학을 전공하며 배운 임상 지식을 바탕으로 공학과 의학을 융합하는 새로운 학문을 탐구하는 과정은 쉽지 않았지만, 그만큼 값진 성장을 이룰 수 있었습니다.

무엇보다도 본 연구를 지도해 주시고 끊임없는 조언과 격려를 아끼지 않으신 조성호 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 연구의 초기 구상부터 논문 작성에 이르기까지 교수님께서 보여주신 세심한 지도와 열정이 없었다면 이 논문을 완성할 수 없었을 것입니다. 또한, 학위논문 심사를 맡아 주신 박현경 교수님과 전진용 교수님께도 진심으로 감사드립니다. 심사 과정에서 주신 소중한 의견과 조언이 논문의 완성도를 높이는 데 큰 도움이 되었습니다.

아울러, 석사 과정 동안 함께 학문적 고민을 나누고 서로에게 힘이 되어 준 동기들에게도 감사의 마음을 전합니다. 어려운 순간마다 나누었던 격려와 응원이 저를 끝까지 포기하지 않도록 이끌어 주었습니다. 특히, 직장과 학업과 연구를 병행하며 부족했던 저를 이해하고 묵묵히 응원해 주신 가족들에게도 깊은 감사의 인사를 드립니다. 여러분의 지지와 사랑이 제가 이 과정을 끝까지 마칠 수 있는 원동력이 되었습니다.

마지막으로, 디지털의료융합학과에서 쌓은 경험과 지식을 바탕으로, 의료와 공학의 융합이 만들어 낼 더 나은 미래에 기여할 수 있기를 소망합니다. 이 모든 여정에서 도움을 주신 모든 분들께 다시 한 번 감사드립니다.

연구 윤리 서약서

본인은 한양대학교 대학원생으로서 이 학위논문 작성 과정에서 다음과 같이 연구 윤리의 기본 원칙을 준수하였음을 서약합니다.

첫째, 지도교수의 지도를 받아 정직하고 엄정한 연구를 수행하여 학위논문을 작성한다.

둘째, 논문 작성시 위조, 변조, 표절 등 학문적 진실성을 훼손하는 어떤 연구 부정행위도 하지 않는다.

셋째, 논문 작성시 논문유사도 검증시스템 "카피킬러"등을 거쳐야 한다.

2024년12월19일

학위명 : 석사

학과 : 디지털의료융합학과

지도교수 : 조성호

성명 : 유아현

한 양 대 학 교 대 학 원 장 귀 하

Declaration of Ethical Conduct in Research

I, as a graduate student of Hanyang University, hereby declare that I have abided by the following Code of Research Ethics while writing this dissertation thesis, during my degree program.

"First, I have strived to be honest in my conduct, to produce valid and reliable research conforming with the guidance of my thesis supervisor, and I affirm that my thesis contains honest, fair and reasonable conclusions based on my own careful research under the guidance of my thesis supervisor.

Second, I have not committed any acts that may discredit or damage the credibility of my research. These include, but are not limited to : falsification, distortion of research findings or plagiarism.

Third, I need to go through with Copykiller Program(Internet-based Plagiarism-prevention service) before submitting a thesis."

DECEMBER 19, 2024

Degree : Master

Department : DEPARTMENT OF MEDICAL AND DIGITAL ENGINEERING

Thesis Supervisor : CHÓ, SUNG HO

Name : YOO,AH-HYUN

(Signature) 