

3차원 보행분석을 통한 무릎 모음 모멘트와 고관절 내외회전의 임상적 특성

김용욱¹ · 강승묵^{2‡}

¹전주대학교 물리치료학과, ^{2‡}전주대학교 게임콘텐츠학과

Clinical Characteristics of Hip Joint Rotations and Knee Adduction Moment through 3D Gait Analysis

Kim Yongwook, PT, Ph.D¹ · Kang Seungmook, MFA^{2‡}

¹*Dept. of Physical Therapy, Jeonju University*

^{2‡}*Dept. of Game Contents, Jeonju University*

Abstract

Purpose : The purpose of this study was to verify the relationships among the knee adduction moment, hip rotation range, strength of hip rotators, and Foot Posture Index of healthy young adults.

Method : Thirty-two healthy adults(24 male, 8 females) participated in this study. Subjects performed 5 walking trials to evaluate the knee adduction moments using a three-dimensional motion analysis system. Hip rotation ranges and hip rotator strengths were measured using a standard goniometer and a handheld dynamometer, respectively. The mean of three trials of clinical tests was used for data analysis.

Results : The first peak knee adduction moment was significantly correlated with the hip rotation ranges and hip rotator strengths ($P<.05$). The second peak knee adduction moment was showed significant correlations with hip external rotation and rotation ratio. There were no correlations between Foot Posture Index and all knee adduction moments ($P>.05$).

Conclusion : This study suggests that imbalances of the range of motion and strength of the internal and external rotation of the hip joint can affect knee adduction moments. The impact may exacerbate musculoskeletal disorders such as osteoarthritis of the knee. Therefore, further studies should be conducted to evaluate the effects of clinical interventions to correct these imbalances on the reduction of the knee adduction moments in patients with knee osteoarthritis.

Key Words : hip joint characteristics, knee joint moment, osteoarthritis

‡교신저자 : 강승묵, xevious@jj.ac.kr

I. 서론

보행 중 무릎에서 발생하는 관절 모멘트는 다양한 요인에 의해 결정되며, 비정상적 무릎관절 모멘트는 무릎 골관절염 등 근골격계 질환의 발생과 밀접한 관계가 있다(Henriksen 등, 2010; Miyazaki 등, 2002). 걷는 동안 발생하는 무릎관절 모멘트는 관상면(coronal plane)의 모음-벌림 모멘트, 시상면(sagittal plane)의 굽힘-펴기 모멘트와 수평면(horizontal plane)에서 발생하는 회전 모멘트 등으로 구성된다(Teng 등, 2015; Chong 등, 2017; Shin 등, 2011). 보행 중 체중을 지면에 지지하는 입각기(stance phase) 시 실시간으로 발생하는 무릎관절 모멘트는 3차원적 지면반발력(ground reaction force)의 크기와 무릎 중심축(knee joint center) 사이의 수직 거리(lever arm)를 곱하여 계산되는 생체역학적 변수이다.

다양한 무릎관절 모멘트 중 무릎 모음모멘트(knee adduction moment; KAM)는 무릎 골관절염의 발생과 가장 밀접한 관련이 있는 것으로 보고되었으며(Baliunas 등, 2002), 특히 고령에서 발생하는 무릎 골관절염에서 KAM이 증가할수록 무릎관절이 내반(varus)되는 정렬 이상이 나타나고 무릎 골관절염을 악화시키는 것으로 보고되었다(Sharma 등, 1998). 따라서 무릎 골관절염을 치료하고 관리하기 위한 다양한 보존적 중재법이 증가된 KAM을 줄여주어 무릎 관절에 걸리는 과부하를 낮추는데 초점을 맞춰 적용되었으며, 이러한 보존적 중재법으로 신발에 삽입하는 보조물(orthotic shoe inserts), 무릎보조기, 특수 신발보조기, 운동치료 등이 있다(Baker 등, 2007; Kutzner 등, 2011; Shakoor 등, 2008).

비록 무릎 골관절염을 치료하기 위한 기존의 다양한 보존적 중재법이 유의하게 KAM을 감소시켜 무릎 통증을 낮추고 관절 유연성, 고유수용성 감각, 삶의 질 등을 높이는 것으로 보고되었으나, 보조기 착용에 따른 불편과 보존적 중재에 대한 개별적 반응의 다양성으로 인해 장기간 적용에 대한 효과 검증이 어려운 단점도 보고되었다(Moyer 등, 2015). 증가된 KAM을 관리하기 위해 적합한 중재법을 찾고 이에 대한 검증이 필요하나, 무릎관절의 KAM에 영향을 미치는 요인이 무엇인지, 하지 관절의 임상적, 생체역학적 특성 사이에 어떠한 상호관계

가 있는지에 대한 검증도 필요하다. 이에 대한 선행 연구에서는 KAM이 증가할수록 무릎관절 내 공간 간격(joint space width)이 유의하게 감소하였다는 보고(Sharma 등, 1998)와 KAM과 발의 각도 및 KAM과 하지 정렬 사이의 상관관계를 알아보는 연구가 진행되었다(Cho 등, 2015). 그러나 KAM과 관련된 하지관절의 임상적 특성을 알아본 선행 연구들은 대부분 무릎관절 내 관절 특성 및 하지 관절의 전반적인 정렬에 대한 것이었고, 무릎관절의 KAM과 관련하여 영향을 주고받을 수 있는 고관절 및 발목관절에서의 임상적, 생체역학적 특성 사이에 어떠한 상호 관계가 존재하는지에 대한 연구는 활발하지 못하였다.

따라서 본 연구의 목적은 고관절과 발목관절의 임상적 특성을 알아보기 위해 임상에서 흔히 사용하는 임상적 측정과 생체역학적 변수인 KAM 사이에 어떠한 관련성이 있는지 알아보고 무릎골관절염의 치료와 관리를 위한 임상적 중재의 새로운 방향을 제시하는 것이다.

II. 연구방법

1. 연구대상자

본 연구는 건강한 성인 남자 24명, 여자 8명으로 총 32명을 대상으로 진행하였다. 모든 연구대상자는 자발적으로 참여에 동의하였고 서면으로 동의서를 제출하였다. 본 연구의 수행을 위해 연구대상자는 10 m 실험실 보행로를 자유롭게 걸을 수 있는 자를 선정하였으며, 신경학적, 근골격계 또는 심폐 기능의 장애가 있는 자는 대상자 선정에서 제외하였다. 본 연구는 헬싱키 선언의 원칙에 따라 수행되었으며, 영국 센트럴랭카셔대학교 연구윤리위원회의 연구 승인(STEMH 347)을 취득한 후 시행되었다.

2. 실험 방법

1) 측정도구

보행 분석을 위한 측정 장비로 Qualisys Motion Capture System(Qualisys, Gothenburg, Sweden)을 사용하

였다. 본 연구에 사용된 Qualisys System은 10대의 적외선 카메라(Oqus-7, Qualisys, Gothenburg, Sweden)와 보행로의 중간에 설치된 4대의 힘판(BP400600, AMTI, Massachusetts, USA)으로 구성되었다. 카메라와 힘판을 통해 얻어진 다양한 생체역학적 측정값은 중앙컴퓨터의 자료 처리 소프트웨어(QTM software, Qualisys, Gothenburg, Sweden)로 보내져 저장되었다. 적외선 카메라의 표본화 비율(sampling rate)은 100 Hz이었고 힘판의 표본화 비율은 500 Hz이었다.

하지 관절의 임상적 특성을 알아보기 위한 측정 도구로 발목관절에 대한 발 자세 지수(Foot Posture Index; FPI)를 사용하였다. 고관절의 내외회전 가동범위의 측정을 위해 12인치 범용 플라스틱 측각기를 사용하였으며, 고관절 내외회전 근력의 측정을 위해 근력계(Lafayette dynamometer, Lafayette, IN, USA)를 사용하였다.

2) 측정방법

무릎관절의 KAM의 측정을 위해 각 대상자는 본인의 발 크기에 맞게 준비된 운동화(DJO Global, Vista, CA, USA)를 신고 자신이 자유롭게 선택한 걷는 속도를 유지하게 하여 10 m 보행로를 걷도록 하였다. 모멘트를 포함한 다양한 생체역학적 보행변수의 측정을 위해 수정된 옥스퍼드 모형(modified Oxford model)을 적용하였다(Collins 등, 2009). 이를 위해 14 mm 반사마커(reflex marker) 52개를 참가자의 하지에 부착하였으며, 부착위치는 수정된 옥스퍼드 발 모형에 따라 양측의 골반, 대퇴, 하퇴, 및 신발에 부착하였다(그림 1). 그림 1에서와 같은 자세로 각 개인의 동적 3차원 보행분석 자료를 처리하기 위해 먼저 해부학적 정적 모형으로 활용되는 정적 자료(static data)를 획득하였다. 총 5회의 동적인 보행 분석 자료를 수집하였으며, 필요한 경우 보행 측정 간 휴식을 취할 수 있도록 하였다. 동적인 보행 분석 실험을 하는 동안 대상자가 보행로에 설치되어 있는 힘판(force plate)에 완전히 발을 접촉을 하지 못하면 그 실험에서 얻은 보행 분석 자료는 삭제하였다.



그림 1. 반사마커 부착 위치

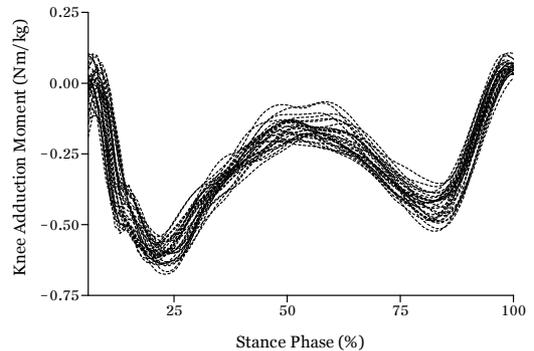


그림 2. 보행 중 입각기 시 무릎 모음모멘트

적외선 카메라와 힘판으로부터 수집된 운동학(kinematics) 및 동력학적(kinetics) 3차원 보행분석의 자료는 Visual 3D 동작 분석 프로그램(C-Motion, Rockville, MD, USA)을 사용하여 최종 처리하였다. 카메라로 수집된 운동학 데이터는 6 Hz의 차단주파수(cut-off frequency)를 통해 저역통과필터링(low-pass filtering)되었다. 힘판으로부터 수집된 동력학 데이터는 15 Hz의 차단주파수로 저역통과필터링 처리하여 분석에 사용하였으며, 이 과정을 통해 무릎관절의 KAM을 계산하였다. 보행 중 입각기 시 KAM은 체중지지의 변화에 따라 두 번의 피크 모멘트 변화 보이며 이러한 피크 모멘트 값을 분석에 사용하였다(그림 2). 운동학 및 동력학적 데이터는 동측 하지의 발뒤꿈치 접촉(heel strike)부터 다음 접촉까지를 1회 보행주기로 정의하여 표준화하였으며, 동력학적 자료 및 관절 모멘트는 각 대상자의 체중을 통해 표준화 처리하였다.

FPI는 발의 정렬이 회내(supination), 회외(pronation) 또는 중립 위치에 있는 정도를 정량화하는 임상 평가 도구로 알려져 있다(Redmond 등, 2006). FPI는 피검자가 정면을 바라보고 편안하게 서있는 자세에서 양발의 정렬을 평가하며, 6가지 세부 평가 항목으로 구성되어 있다. FPI의 각 세부 항목은 -2점에서 +2점으로 평가되며, 총점은 -12점에서 +12점의 범위를 갖는다. 심한 회내 발의 경우 -12점에 가깝고, 심한 회외 발의 경우 +12점에 가깝게 평가된다. 선행 연구에서 FPI 평가도구는 높은 측정자간 신뢰도를 보인다고 보고되었다(Cornwall 등, 2008).

고관절 내외회전의 가동범위와 근력을 측정하기 위해 연구대상자들을 검사대에 엎드려 누운 자세를 취하도록 하였다. 이 자세에서 피검자의 무릎을 90°로 구부리고 이완하도록 요청한 후 검사자가 하퇴를 수동적으로 움직여 고관절 내외회전 가동범위를 측정하였다. 고관절 내외회전 근력은 가동범위 측정과 동일한 자세에서 양쪽 복사뼈(malleolar) 상방 1인치에 근력측정기를 위치하여 최대 고관절 회전력을 측정하였다. 골반 움직임을 방지하기 위해 천골부위를 스트랩으로 고정하였으며, 고관절 내외회전의 가동범위와 근력은 각각 3회 측정하였으며 그 평균값을 통계 분석에 사용하였다. 가동범위와 근력의 측정은 무작위 순서로 진행하였다.

3. 분석 방법

연구대상자의 무릎관절의 KAM과 발목관절의 FPI, 고관절의 내외회전 가동범위 및 근력 사이의 상관관계를 규명하기 위해 피어슨 상관검정을 사용하였다. 본 연구의 통계 분석은 SPSS window용(version 23.0)을 사용하였으며, 유의수준(α)은 .05로 하였다.

III. 연구결과

1. 연구대상자의 일반적 특성

연구대상자의 일반적인 특성은 표 1과 같다. 적정 연구대상자의 표본수를 고려하기 위해서 G*power 3.1을

이용한 결과, 효과크기 .8, 유의수준 .05, 검정정력 .08을 유지하는데 필요한 표본 수는 22명으로, 탈락률을 고려하여 32명을 대상으로 연구를 진행하였다. 연구대상자의 평균 연령, 신장, 체중은 각각 30.4±11.5 세, 174.5±9.6 cm, 72.3±12.9 kg이었다.

표 1. 연구대상자의 일반적 특성 (N=32)

Characteristics	Mean±SD
Gender (M/F)	24/8
Height (cm)	174.5±9.6
Weight (kg)	72.3±12.9
Age (year)	30.4±11.5
Gait speed (cm/s)	135.1±8.5
Cadence (steps/min)	119.5±9.5
Step length (cm)	120.7±12.4
Step width (cm)	11.3±2.1

2. 연구대상자의 무릎 모음모멘트, 고관절 및 발목관절의 임상적 특성

연구대상자의 KAM, FPI, 고관절 내외회전에 대한 가동범위 및 근력에 대한 평균값은 다음과 같다(표 2). 연구대상자의 무릎관절에서의 모든 KAM 변수와 발목관절의 FPI 사이에서는 유의한 상관관계가 없었다($p>.05$) (표 3).

보행 초기 입각기(0-25 % stance)에서의 첫 번째 KAM 피크값과 고관절의 내외회전 가동범위 사이의 상관관계는 모든 비교 변수 사이에서 상관계수 유의한 상관관계를 보였다($p<.05$). 첫 번째 KAM 피크값과 고관절의 외회전 가동범위 사이의 상관계수는 $r=.70$ 으로 유의하게 높은 상관관계를 보였으며, 첫 번째 KAM 피크값과 고관절의 내회전 가동범위 사이의 상관계수는 $r=.46$ 으로 중등도의 유의한 상관관계가 있었다(표 3). 보행 후기 입각기(75-100 % stance)에서의 두 번째 KAM 피크값과 고관절의 외회전 가동범위 사이의 상관계수는 $r=.50$ 으로 중등도의 유의한 상관관계를 보였으며($p<.05$), 두 번째 KAM 피크값과 고관절의 내회전 가동범위 사이의 상관계수는 $r=.29$ 로 유의한 상관관계가 없었으나($p>.05$), 내외회전 가동범위의 비율(ratio)에서는 $r=-0.39$ 로 중등도의

유의한 상관관계를 보였다($p < .05$)(표 3).

첫 번째 KAM 피크값과 고관절의 외회전 근육의 근력 사이의 상관계수는 $r = -.45$ 로 유의하게 중등도의 상관관계를 보였으며($p > .05$), 첫 번째 KAM 피크값과 고관절의 내회전 근력 사이의 상관계수는 $r = .22$ 로 유의한 상관관

계가 없었다($p > .05$)(표 3). 두 번째 KAM 피크값과 고관절 외회전 근력 및 보행의 중간 입각기(25-75 % stance) KAM 최대값과 고관절 외회전 근력 사이에서는 유의한 상관관계가 없었다($p > .05$).

표 2. 연구대상자의 하지관절의 임상적 특성

(N=32)

Characteristics	Mean±SD
KAM (Nm/kg)	
1 st peak 0-25% stance	-0.47±0.16
Maximum 25-75% stance	-0.16±0.08
2 nd peak 75-100% stance	-0.35±0.11
Foot Posture Index (score)	1.82±2.76
Hip Rotation Range	
External Rotation (°)	43.13±14.40
Internal Rotation (°)	39.89±10.93
External/Internal Ratio	1.22±0.69
Hip Rotator Strength	
External Rotator (kgf)	-0.47±0.16
Internal Rotator (kgf)	-0.47±0.16
External/Internal Ratio	1.03±0.49

표 3. 무릎 모음모멘트와 하지관절의 임상적 특성 사이의 상관관계

(N=32)

Characteristics	Knee adduction moment		
	1 st peak 0-25% stance	Maximum 25-75% stance	2 nd peak 75-100% stance
Foot Posture Index (score)	-0.04	0.08	0.05
Hip Rotation Range			
External Rotation (°)	-0.70*	-0.07	-0.50*
Internal Rotation (°)	0.46*	0.26	0.29
External/Internal Ratio	-0.69*	-0.10	-0.39*
Hip Rotator Strength			
External Rotator (kgf)	-0.45*	0.09	-0.25
Internal Rotator (kgf)	0.22	0.20	0.26
External/Internal Ratio	-0.40*	0.02	-0.25

* $p < .05$

IV. 고 찰

본 연구는 보행 중 입각기 시 무릎관절에서 발생하는 무릎 모음모멘트와 영향을 주고받는 다양한 요인 중 발목 관절의 해부학적 정렬위치와 고관절의 임상적 특성이 KAM과 어떠한 상관성을 갖는가를 알아보기 위해 시행되었다. 본 연구에서는 발목 관절의 임상적 특성을 평가하기 위해 FPI를 사용하였다. FPI는 선 자세에서의 정적인 발목관절의 정렬을 평가하는 임상적 평가도구로서 높은 평가 신뢰도를 가지면서도 측정이 비교적 간단하고, 평가 시간과 비용면에서 매우 효율성이 높은 평가 도구로 알려져 있다(Rokkedal-Lausch 등, 2013). 선행 연구에서는 무릎관절의 KAM과의 상관성을 알아보려고 고관절의 모음 각도, 대퇴사두근 근력, Q 각도 등의 특성 요인을 사용하였으나(Barrios 등, 2010; Cho 등, 2015), 고관절 내외회전의 특성과 KAM 사이의 연관성을 검증한 연구가 없었기 때문에, 본 연구에서는 KAM과 관련된 고관절의 임상적 특성으로 고관절의 내외회전 가동범위와 근력을 선택하여 상관성을 검증하였다.

본 연구의 결과 KAM에서 대표되는 세 가지 모든 변수와 FPI사이에서는 유의한 상관관계가 없었다($p>.05$). 본 연구의 결과와는 다르게, 보행 시 KAM과 발목관절의 임상적 특성 사이의 상관성을 알아본 기존연구에서는 입각기의 처음과 마지막 단계에서 발생하는 첫 번째 KAM 피크값과 두 번째 KAM 피크값 모두에서 발 진행 각도(foot progression angle) 사이에 유의한 상관관계가 있었다고 보고하였다($p<.05$)(Cho 등, 2015). 선행 연구에서 발 진행 각도에 대한 정의가 명확히 기술되지 않았으나, 본 연구의 KAM과 FPI사이의 상관성 결과와 차이가 있었던 이유는 발의 위치 정렬의 각도를 측정하는 방법의 차이 때문으로 사료된다. 즉, 본 연구에서 사용된 FPI는 정적인 선 자세에서의 발의 정렬 상태를 평가한 반면, 선행 연구에서의 발 진행 각도는 동적인 보행을 하는 동안의 발의 정렬을 평가하였다. Lin 등(2001)의 연구에 의하면, 보행 중 발의 벌림 보행(toe-out gait)일수록 낮은 KAM 피크값을 보인다고 보고하였다. 이처럼 선행 연구들에서 발의 정렬과 KAM의 관련성을 보고하였으나, 본 연구의 대상자들은 FPI 평균값이 1.82점으로 비교

적 발의 정렬 상태가 중립에 가까운 양호한 상태였기에 KAM과 유의한 상관관계가 없었던 것으로 사료된다.

본 연구에서 보행 초기 입각기(0-25 % stance)에서의 첫 번째 KAM 피크값과 고관절의 내외회전 가동범위 사이에서는 모든 변수 사이에서 유의한 상관관계를 보였다($p<.05$). 첫 번째 KAM 피크값은 무릎관절에서 발생하는 모음 모멘트 중 가장 큰 극단 값이기 때문에 KAM의 대표 변수로 알려져 있고, 첫 번째 KAM의 피크값을 낮추는 것에 무릎내측 골관절염의 치료 초점이 맞춰져 있다(Maly 등, 2002; Shelburne 등, 2008; Moyer 등, 2013). 특히, 고관절의 외회전 가동범위와 첫 번째 KAM 피크값 사이의 상관계수가 $r=-.70$ 로서 가장 큰 상관관계를 보였다. 또한 첫 번째 KAM 피크값과 고관절의 내회전 가동범위 사이에서도 중등도의 유의한 상관관계를 보였다. 이러한 본 연구의 결과와 직접적으로 비교할 수 있는 선행연구는 없었으나, KAM 피크값과 하지관절의 정렬 사이의 관계를 보고한 선행연구에서 고관절의 모음각(adduction angle)이 증가하고 무릎관절에서의 내반각(varus angle)이 감소할수록 KAM 피크값이 감소되었다고 보고하였다(Barrios 등, 2010). 본 연구의 결과는 고관절 외회전이 증가할수록 KAM이 커지고, 고관절 내회전이 증가할수록 KAM이 감소됨을 보여 주었다. 이는 내반 정렬(varus alignment)의 무릎에서 상대적으로 고관절의 외회전이 내회전에 비해 증가하는 경향을 보이고, 외반(valgus) 무릎의 경우 고관절에서 이와 반대의 경향이 있기 때문으로 사료된다.

첫 번째 KAM 피크값과 고관절의 내외회전 근력 사이에서도 고관절 가동범위의 결과와 유사한 상관성을 보였다. 이는 고관절 내외회전 가동범위와 근력 사이에 유의한 상관성이 존재하기 때문으로 사료된다. 즉, 과도한 고관절의 내회전은 외회전 근육의 길이를 늘려 신장 약화(stretch weakness)를 일으키고, 반대로 과도한 고관절 외회전은 내회전 근육의 신장 약화를 불러와 고관절 회전근육 간 불균형을 초래하는 것으로 알려져 있다(Cibulka 등, 2010). 보행 중 입각기의 중간 단계(25-75 % stance)에서 발행하는 KAM과 고관절의 임상적 특성 사이에서는 유의한 상관관계가 없었다($p>.05$). 입각기의 중간단계는 초기 입각기 시 발생하는 지면반발력의 최대 크기가 체중의 전방 추진에 따라 상쇄되며 낮은 KAM

참고문헌

양상을 보이기 때문에 상위 고관절에서의 임상 특성과 상호 영향을 미치지 못하기 때문으로 사료된다.

본 연구는 제한점은 다음과 같다. 연구대상자의 확보에 어려움으로 무릎 골관절염이 있는 대상이 아닌 일반인을 대상으로 연구가 진행되어 본 연구의 결과를 일반화하는데 제한이 있다. 또한, 측정의 제한 등으로 KAM에 영향을 줄 수 있는 하지 관절의 임상적, 생체역학적 특성에 대한 다양한 평가가 이루어지지 못했다. 무릎관절에서 발생하는 다양한 모멘트 중 무릎 굽힘 모멘트(knee flexion moment; KFM)는 대퇴슬개관절(patellofemoral joint)에 영향을 주어 골관절염을 일으키는 것으로 알려져 있고(Teng 등, 2015), 무릎 회전모멘트(knee rotation moment; KRM)는 무릎관절 내부의 십자인대 및 반월판 등의 구조물에 영향을 미치는 것으로 보고되었다(Henriksen 등, 2011). 따라서 향후 연구에서는 다양한 형태의 무릎 골관절염 환자를 대상으로 무릎관절에서 발생하는 세 가지 모멘트 특성과 하지 관절의 다양한 임상적, 생체역학적 특성 사이에 어떠한 상호 관계가 있는지를 검증하는 것이 필요할 것이다.

V. 결론

본 연구는 건강한 성인 남녀 32명을 대상으로 무릎관절의 KAM과 하지관절의 임상적 특성 사이에 어떠한 상호 관계가 있는지 알아보았다. 본 연구의 결과, KAM의 첫 번째 피크값과 고관절 내외회전 가동범위 및 근력 비율 사이에서 중등도 이상의 상관관계가 있었다. 본 연구를 통해 고관절 내외회전 가동범위와 근력의 불균형이 무릎관절의 KAM에 영향을 줄 수 있으며, 이는 무릎 골관절염과 같은 근골격계 질환을 더욱 악화시킬 수 있는 요인을 작용할 수 있음을 암시한다. 따라서 무릎 골관절염 환자를 대상으로 고관절 내외회전 가동 범위와 근력의 불균형을 바로 잡는 임상적 중재가 KAM의 감소에 미치는 영향을 검증하는 후속 연구가 진행되어야 할 것이다.

- Baker K, Goggins J, Xie H, et al(2007). A randomized crossover trial of a wedged insole for treatment of knee osteoarthritis. *Arthritis Rheum*, 56(4), 1198-1203.
- Baliunas AJ, Hurwitz DE, Ryals AB, et al(2002). Increased knee joint loads during walking are present in subjects with knee osteoarthritis. *Osteoarthritis Cartilage*, 10(7), 573-579.
- Barrios JA, Crossley KM, Davis IS(2010). Gait retraining to reduce the knee adduction moment through real-time visual feedback of dynamic knee alignment. *J Biomech*, 43(11), 2208-2213.
- Cho Y, Ko Y, Lee W(2015). Relationships among foot position, lower limb alignment, and knee adduction moment in patients with degenerative knee osteoarthritis. *J Phys Ther Sci*, 27(1), 265-268.
- Chong HC, Tennant LM, Kingston DC, et al(2017). Knee joint moments during high flexion movements: Timing of peak moments and the effect of safety footwear. *Knee*, 24(2), 271-279.
- Cibulka MT, Strube MJ, Meier D, et al(2010). Symmetrical and asymmetrical hip rotation and its relationship to hip rotator muscle strength. *Clin Biomech*, 25(1), 56-62.
- Collins TD, Ghousayni SN, Ewins DJ, et al(2009). A six degrees-of-freedom marker set for gait analysis: repeatability and comparison with a modified Helen Hayes set. *Gait Posture*, 30(2), 173-180.
- Cornwall MW, McPoil TG, Lebec M, et al(2008). Reliability of the modified Foot Posture Index. *J Am Podiatr Med Assoc*, 98(1), 7-13.
- Henriksen M, Bennell KL, Hinman RS, et al(2011). The knee rotation moment. a new pathomechanical paradigm in OA? *Osteoarthritis Cartilage*, 19(S1), S89-S90.
- Henriksen M, Graven-Nielsen T, Aaboe J, et al(2010). Gait changes in patients with knee osteoarthritis are replicated by experimental knee pain. *Arthritis Care Res*, 62(4), 501-509.

- Kutzner I, Küther S, Heinlein B, et al(2011). The effect of valgus braces on medial compartment load of the knee joint - in vivo load measurements in three subjects. *J Biomech*, 44(7), 1354-1360.
- Lin CJ, Lai KA, Chou YL, et al(2001). The effect of changing the foot progression angle on the knee adduction moment in normal teenagers. *Gait Posture*, 14(2), 85-91.
- Maly MR, Culham EG, Costigan PA(2002). Static and dynamic biomechanics of foot orthoses in people with medial compartment knee osteoarthritis. *Clin Biomech*, 17(8), 603-610.
- Miyazaki T, Wada M, Kawahara H, et al(2002). Dynamic load at baseline can predict radiographic disease progression in medial compartment knee osteoarthritis. *Ann Rheum Dis*, 61(7), 617-622.
- Moyer RF, Birmingham TB, Bryant DM, et al(2015). Valgus bracing for knee osteoarthritis: a meta-analysis of randomized trials. *Arthritis Care Res*, 67(4), 493-501.
- Moyer RF, Birmingham TB, Dombroski CE, et al(2013). Combined effects of a valgus knee brace and lateral wedge foot orthotic on the external knee adduction moment in patients with varus gonarthrosis. *Arch Phys Med Rehabil*, 94(1), 103-112.
- Redmond AC, Crosbie J, Ouvrier RA(2006). Development and validation of a novel rating system for scoring standing foot posture: the Foot Posture Index. *Clin Biomech*, 21(1), 89-98.
- Rokkedal-Lausch T, Lykke M, Hansen MS, et al(2013). Normative values for the foot posture index between right and left foot: a descriptive study. *Gait Posture*, 38(4), 843-846.
- Shakoor N, Lidtke RH, Sengupta M, et al(2008). Effects of specialized footwear on joint loads in osteoarthritis of the knee. *Arthritis Rheum*, 59(9), 1214-1220.
- Sharma L, Hurwitz DE, Thonar EJ, et al(1998). Knee adduction moment, serum hyaluronan level, and disease severity in medial tibiofemoral osteoarthritis. *Arthritis Rheum*, 41(7), 1233-1240.
- Shelburne KB, Torry MR, Steadman JR, et al(2008). Effects of foot orthoses and valgus bracing on the knee adduction moment and medial joint load during gait. *Clin Biomech*, 23(6), 814-821.
- Shin CS, Chaudhari AM, Andriacchi TP(2011). Valgus plus internal rotation moments increase anterior cruciate ligament strain more than either alone. *Med Sci Sports Exerc*, 43(8), 1484-1491.
- Teng HL, MacLeod TD, Link TM, et al(2015). Higher knee flexion moment during the second half of the stance phase of gait is associated with the progression of osteoarthritis of the patellofemoral joint on magnetic resonance imaging. *J Orthop Sports Phys Ther*, 45(9), 656-664.