



한국운동역학회지, 2003, 제13권 1호, pp. 13-21
Korean Journal of Sport Biomechanics
2003, Vol. 13, No. 1, pp. 13-21

전방십자인대 수술이 시행되어진 슬관절과 정상 슬관절의 유효 모멘트암 (effective moment arm) 비교 분석

채 원 식(경북대학교)

ABSTRACT

Bilateral Comparison of Effective Moment Arms of the Quadriceps Force on Unilateral ACL-Reconstructed Individuals

Chae, Woen-Sik(Kyungpook National University)

Chae, W-S. Bilateral Comparison of Effective Moment Arms of the Quadriceps Force on Unilateral ACL-Reconstructed Individuals . Korean Journal of Sport Biomechanics, Vol. 13, No. 1, pp. 13-21. The purpose of this study is (a) to estimate effective moment arms of quadriceps forces and (b) to compare the d_e between the ACL-reconstructed and uninjured knees from the same individual. One female (20 yrs old, 2 yrs post-op, hamstring tendon autograft) and two males (22 yrs old, 2 yrs post-op; 28 yrs old, 4 yrs post-op; patellar tendon autografts for both). Sagittal view radiographs were obtained for 6-7 different angles (range 5°-110°) from each knee. The d_e was determined by the method of Chow et al. (1999a).

The results showed that the maximum d_e values ranged from 4.61 to 5.59 cm and 4.59 to 4.89 cm for the ACL-reconstructed and uninjured knees, respectively. The maximum d_e occurred between 35° and 50° and 20° and 50° for the ACL-reconstructed and uninjured knees, respectively. The minimum d_e values ranged from 4.12 to 4.35 cm and 3.12 to 3.63 cm for the ACL-reconstructed and uninjured knees, respectively.

본 논문은 2001년 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2001-037-IA0008)
2003년 3월 21일(금) 접수

* Corresponding author, 교수, 702-701, 대구광역시 북구 산격동 1370번지 경북대학교 사범대학 체육교육과
연락처 : chaebiom@hanmail.net, Tel : 018-670-6710

The effective moment arm of the knee extensor affects the loads on knee ligaments during knee-extension exercises. Because apparent differences in the moment arm of the quadriceps in different participants, it is very important to use personalized knee joint geometry for the computation of knee joint force.

In the present study, no noticeable bilateral difference was found in the male subjects. However, apparent bilateral differences in d_e were observed in the female subject. This suggests that the effects of ACL reconstruction surgery on patellar mechanism deserve further investigation.

Keywords : Moment, Quadriceps

I. 서 론

1. 연구의 필요성

동작이 수행되어질 때 활막성 관절인 슬대퇴관절 부하(patello-femoral joint contact force)를 계산하기 위해서는 대퇴사두근에 발생되어지는 근내력 (internal muscle force)과 슬개인대에 발생되어지는 내력이 반드시 정량화 되어져야 한다. 각 근육에 발생되어지는 근내력은 흔히 감소법(reduction)이나 최적화방법(optimization)과 같은 간접 방법을 통해 내력을 유추하여 정량화 할 수 있다. 그러나, 슬개인대에서 발생되어지는 장력은 무릎관절의 기하학적 구조 변화에 따라 상이하게 나타나며 위에서 설명한 방법들을 통해 내력을 정량화 할 수 없다. 흔히 슬개인대에 발생되어지는 내력은 대퇴사두의 근내력과 무릎관절의 기하학적인 구조에 의해 설명되어지며, 특히 유효 모멘트암은 슬개인대에 의해 발생되어지는 회전력에 정비례하기 때문에 슬대퇴관절 부하에 직접적인 영향을 미치게된다.

Nisell et al. (1985)의 연구에서 여성들은 슬개인대의 모멘트암 (moment arm) 길이가 남자들 보다 상대적으로 짧은 것으로 밝혀졌고, 선행연구들(Bandi, 1972; Chow, 1999; Grood & Suntay, 1984; Haxton, 1945; Herzog, 1985; Kaufer, 1971; Lindahl & Movin, 1967; Nisell et al., 1986; Smidt, 1973)에서 유효 모멘트암은 피험자들에 따라 상대적으로 다양하게 나타났기 때문에 슬대퇴관절의 부하를 계산할 시에는 개인의 무릎관절 구조와 형태의 정확한 파악과 분석을 통하여 유효 모멘트암이 계산되어져야 한다. 슬관절 부상 후 행하여지는 다양한 외과적 수술이 슬개골의 대퇴사두건과 슬개인대에 대한 상대적 위치, 대퇴사두건과 슬개인대의 작용선과 같은 무릎관절의 구조와 형태에 전반적인 변화를 유발할 수 있을 것이라 추정되어지며, 정상적인 슬관절의 기하학적인 구조를 통해 밝혀진 유효 모멘트암의 값을 외과적인 수술을 받은 비정상적인 슬관절을 가진 피험자들에게 적용한다면 정확한 슬대퇴관절 부하를 유추하는데 많은 문제점이 유발되어지리라 생각되어진다.

본 연구는 슬개인대에서 발생되어지는 내력을 유추하기 위한 선행단계로써 최대 부하의 정적 무릎 신전 운동 시, 전방십자인대 수술이 시행되어진 왼쪽 슬관절과 동일 피험자의 정상적인 오른쪽 슬관절 유효 모멘트암(d_e)을 계산하여 비교 분석하는데 목적을 두고 있다.

II. 연구 방법

1. 연구 대상자

본 실험의 피험자는 왼쪽 슬관절 전방십자인대 수술을 받은 남자 2명과 여자 1명을 대상으로 하였으며, 피험자의 신체적 특성은 표 1과 같다. 피험자들의 권리를 보호하기 위해 피험자들은 연구의 방법과 연구를 실행함에 의해 발생되어질 수 있는 위험성들이 제시되어진 승낙 동의서에 서명하였다.

표 1. 피험자의 신체적 특성

피험자	성	십자인대 재건 수술방법	수술후 경과 기간	나이 (yrs)	신장 (cm)	몸무게 (N)
S1	여자	슬건근 이식	2년	20	168	529.7
S2	남자	슬개건 이식	2년	22	173	645.2
S3	남자	슬개건 이식	4년	28	175	863.3

2. 실험 방법

전방십자인대 수술이 시행되어진 슬관절과 정상적인 슬관절의 기하학적 구조 변화를 비교하기 위해 동일 피험자의 양쪽 슬관절을 분석하였다. 전방십자인대 수술이 시행되어진 왼쪽 슬관절은 6가지 무릎 각도(5°, 20°, 35°, 50°, 70°, 90°)를 유지한 상태에서 방사선 사진을 이용해 무릎의 시상면이 촬영되었으며, 동일 피험자의 정상적인 오른쪽 슬관절은 7가지 다리 무릎 각도(5°, 20°, 35°, 50°, 70°, 90°, 110°)를 유지한 상태에서 촬영되어졌다. 무릎 굴곡 각도는 대퇴 종축의 연장선과 하퇴 사이의 각으로 설정되어졌다. 방사선 촬영시, 피험자는 방사선 필름 바로 옆에 무릎을 걸쳐 앉을 수 있게 연구자에 의해 제작된 특수한 결상 위에서 최대 부하의 정적 무릎 신전 운동을 수행했다 (그림 1, 2). 구멍이 뚫린 앵글 철은 결상의 아래쪽과 뒤쪽에 장치되어 짐쇠를 위한 고정장치를 제공했으며, 정적 무릎 신전 운동을 하는데 저항을 주기 위해 쇠줄의 한쪽 끝은 발목 관절의 묶는 끈으로 연결되었고 반대쪽 끝은 카라비너를 이용해 앵글 철에 연결되어졌다. 무릎 굴곡 각도는 쇠줄의 길이와 앵글철에 연결된 카라비

너의 위치를 조정하여 설정되어졌다. 초기 설정된 무릎 굴곡 각도의 편차를 보기 위해 방사선 촬영에 앞서 한 대의 디지털 카메라(Sony DCRTRV320)를 이용하여 피험자의 하지를 촬영하였다. 실제 길이를 계산하기 위해 길이가 185.4 mm 와 152.4 mm 인 두 개의 핀을 대퇴의 원위쪽과 하퇴의 근위쪽에 붙여 방사선 촬영을 하였다.



그림 1. 실제 방사선 촬영 사진



그림 2. 연구자에 의한 슬관절 방사선 촬영에 앞선 정적 신전 수축 운동법 제시

3. 자료 분석

1) 방사선 사진 분석

각기 다른 6-7가지의 무릎 각도에서 대퇴골에 대한 슬개골의 상대적 위치, 슬개인대와 대퇴사두건의 작용선을 찾기 위해 방사선 사진을 분석하였다. 일반적으로 방사선 분석을 위해 사용되어지는 조명박스에 방사선 사진을 놓고 그 위에 투명한 슬라이드 종이(transparency)를 놓아 아래에서 설명되어지는 9개의 점들과 두 개의 쇠로 된 핀의 양끝부분을 확인하여 표시하였다 (그림 3).

1. 경골 조면(F)
2. 슬개골첨(G)
3. 대퇴사두건 작용선의 한 점(J)
4. 슬개골저(I)
5. 대퇴사두건과 슬개인대의 작용선이 만나는 점(C)
6. 대퇴골과 슬개골의 접점(L)
7. 대퇴골과 경골의 접점(B)
8. 대퇴좌표계의 원점(O)
9. 대퇴좌표계를 설정하기 위한 점(P)

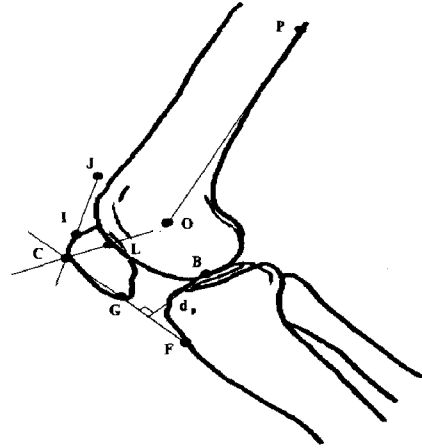


그림 3. 방사선 사진을 이용해서 디지털이징 되어진 점들

위에서 설명되어진 9개의 점들을 표시하기 위해 다음과 같은 몇 가지 지침을 만들었다.

1. 대퇴골과 경골의 접점은 두 뼈가 겹쳐지는 부분의 가장자리점을 선택하였다.
2. 대퇴사두건의 작용선과 슬개골과 대퇴골의 접점을 방사선 사진을 통해 확실히 밝혀내지 못할시에는 슬개인대의 작용선(선 FG)과 대퇴사두건의 작용선(선 JJ), 슬개골과 대퇴골의 접해지는 면에 수직되는 선(선 C)이 하나의 점에 모이게 될 수 있게 함으로써 점 J와 L을 밝혀냈다.
3. 대퇴좌표계 설정을 위한 원점(O)은 타원형의 형태인 대퇴의 내외측과 (femoral condyles) 외형의 윤곽을 그려 직경이 가장 큰 부분을 밝혀냈고 원점은 그 직경의 중간부분을 설정했다.
4. 대퇴골두는 방사선 촬영의 제한점 때문에 방사선 촬영에 포함되지 못했다. 이러한 이유로 대퇴골 후면의 가장 아랫부분을 대퇴좌표계 설정을 위한 점(P)라 설정했다.

자료 분석은 본 연구자와 특별히 방사선 사진 분석을 위해 지도된 학생에 의해 독립적으로 시행되어졌다. 투명한 슬라이드 종이는 스캐너(HP PrecisionScan Pro 1.01, Hewlett-Packard CO)을 이용하여 해상도 600 dpi로 스캔되어졌고 스캔되어진 영상은 UTHSCSA Image Tool Software (Version 2.0, <http://ddsd.uthscsa.edu>)를 사용하여 9개의 점과 쇠로 된 두 판의 위치 좌표값을 얻었다. 본 연구자와 독립적으로 분석을 행한 학생이 얻은 값들의 평균을 차후 분석에 사용하였다. 쇠로 된 두 판의 실지 길이와 디지털이징 단위를 이용해서 전환율(conversion factor)를 구했으며, 모든 점들의 좌표값은 대퇴좌표계로 표현되어졌고, 전환율을 사용하여 모든 값들은 실지길이인 cm로 변환되어졌다.

2) 유효 모멘트암 계산방법

방사선 촬영 영상은 2차원이기 때문에 본 연구에서는 슬개인대와 대퇴사두건의 작용선은 시상면에 국한되어진다고 가정하였다. Chow et al. (1999a)에 의해 설명되어진 절차를 통해서 대퇴사두근의 유효

효 모멘트암의 길이를 계산하였다. 그림 4의 자유물체도(Free body diagram)에서 F_p 는 슬개인대에서 발생되어지는 장력이며 F_q 는 대퇴사두근에 의해 전해지는 근력이다. d_1 과 d_2 의 길이는 슬개골과 대퇴골 접점에서 F_p 와 F_q 의 작용선에 가장 짧은 거리이다. 슬개골의 무게가 굉장히 적기 때문에 본 연구에서는 슬개골의 무게를 고려하지 않았다. 점 L에 대한 모멘트의 합을 구하면:

$$F_q d_2 = F_p d_1 \quad (1)$$

이식을 다시 F_p 에 대해서 풀면

$$F_p = F_q d_2 / d_1 \quad (2)$$

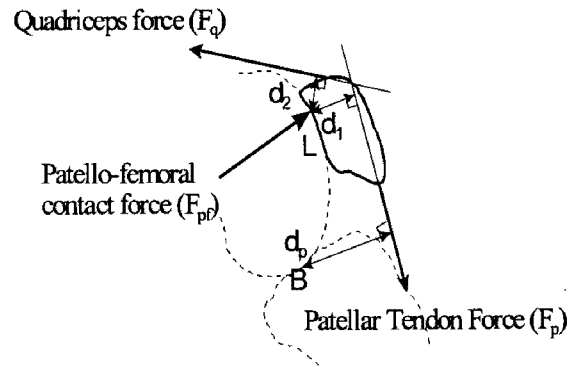


그림 4. 시상면에 놓인 슬개골의 자유물체도

그림 3에서 보는 것과 같이 d_p 는 경골과 대퇴골의 접점에서 슬개인대의 작용선 사이의 가장 짧은 거리 (the shortest distance between the center of tibio-femoral contact (B) and the line of action of F_p)이다. 그러므로, 점 B에서 대퇴근의 수축작용에 의해 발생하는 무릎 신전 모멘트는 아래와 같이 구할 수 있다:

$$T_e = F_p d_p \quad (3)$$

식 2를 식 3에 대입하면:

$$T_e = (F_q d_2 / d_1) d_p = F_q (d_p d_2 / d_1) = F_q d_e \quad (4)$$

이식에서 d_e 를 흔히 점 B에 대한 F_q 의 유효 모멘트암이라고 한다. 방사선 사진에서 얻어낸 좌표값을 사용하여, 점 B와 선 FC(d_p), 점 L과 선 FC(d_1), 점 L과 선 CJ(d_2)사이의 가장 짧은 거리를 계산함에 의해 유효 모멘트암(d_e)을 얻을 수 있다.

Ⅲ. 결과 및 토론

각 피험자의 최대, 최소 유효 모멘트암(d_e)의 길이는 표 2에 제시되었다. 전방십자인대 수술이 시행되어진 슬관절의 최대 d_e 값은 4.61~5.59 cm 이며 동일 피험자에 있어 정상 슬관절의 최대 d_e 값은 4.59~4.89 cm로 나타났다. 전방십자인대 수술이 시행되어진 슬관절의 최소 d_e 값은 4.12~4.35 cm 이며 정상 슬관절의 최소 d_e 값은 3.12~3.63 cm로 나타났다. 본 연구에서 남성 피험자의 경우 전방십자인대 수술이 시행되어진 슬관절과 정상 슬관절의 d_e 값이 유사하게 나타났다. 이에 반해 여성 피험자의 d_e 값은 전방십자인대 수술이 시행되어진 슬관절과 정상 슬관절 사이에 명백한 차이가 있는 것으로 나타났다.

표 2. 남녀 피험자의 유효 모멘트암 길이

피험자	전방십자인대 수술이 시행된 슬관절			정상적인 슬관절		
	Min ^a	Max ^a	M(SD) ^b	Min ^c	Max ^c	M(SD) ^d
S1	4.12	5.59	4.52 (0.63)	3.12	4.59	3.99 (0.67)
S2	4.12	4.61	2.99 (0.29)	3.39	4.75	4.26 (0.55)
S3	4.35	4.85	3.59 (0.61)	3.63	4.89	4.41 (0.56)

^a6가지 다른 유효 모멘트암의 길이중 최소, 최대의 값

^b6가지 다른 유효 모멘트암의 평균, 표준편차의 값

^c무릎굴곡각 110°를 제외한 6가지 다른 유효 모멘트암의 길이중 최대의 값

^d무릎굴곡각 110°를 제외한 6가지 다른 유효 모멘트암의 평균, 표준편차의 값

전방십자인대 수술이 시행된 슬관절에 있어, 여성 피험자의 최대 d_e 값은 남성 피험자의 최대 d_e 값 보다 큰 것으로 나타났다. 전방십자인대 수술이 시행된 여성 피험자의 슬관절에서 계산되어진 최대 d_e 값은 정상적인 슬관절의 최대 d_e 값 보다 크게 나타났다. 또한, 전방십자인대 수술이 시행된 모든 슬관절에서 최소 d_e 값이 정상 슬관절 보다 크게 나타났다.

선행연구들에 있어 무릎 굴곡 각도에 따른 d_e 값의 변화 형태(그림 5)는 30° 전후까지 상향곡선을 이루다가 그 후에 하향곡선을 이루며, 이와 같은 형태는 대부분의 선행연구들에서 유사하게 나타났다. 그러나, d_e 값을 찾는 방법과 피험자의 샘플이 선행연구들마다 다르기 때문에 선행연구들에서 밝혀진 d_e 값은 잘 일치되어지지 않는다. 본 연구의 그림6에 제시된 무릎 굴곡 각도와 d_e 값의 관계에서, 전방십자인대 수술이 시행되어진 슬관절은 정상적인 슬관절 보다 d_e 값의 최대치에 뒤늦게 이르는 것으로 밝혀졌다. 전방십자인대 수술이 시행되어진 슬관절에 있어선 무릎 굴곡 각이 35°~50° 사이에서 최대 d_e 값이 발생되어졌고, 정상 슬관절에선 20°~50° 사이에서 최대 d_e 값이 발생되어졌다. 또한, 전방십자인대 수술이 시행되어진 슬관절에서 계산되어진 d_e 값은 선행연구들에 비해 상대적으로 크게 나타났다. 이런 원인은 전방십자인대 수술이 슬개골에 작용하는 대퇴사두건과 슬개인대의 작용선 방향에 변

화를 유발시키며, 대퇴사두근과 슬대퇴관절의 접점사이의 길이 혹은 경골과 대퇴골의 접점에서 슬개 인대의 작용선 사이의 거리 (그림 4에서 d_2 와 d_p)를 증가시키는 것으로 사료되어진다. 또한, 정상적인 슬관절 보다 전방십자인대 수술이 시행되어진 슬관절에 있어 d_e 값의 분산이 크게 나타났으며, 이는 전방십자인대 수술이 개인 무릎관절의 기하학적인 구조 변화에 확연한 영향이 미치는 것으로 설명되어 질 수 있을 것이다.

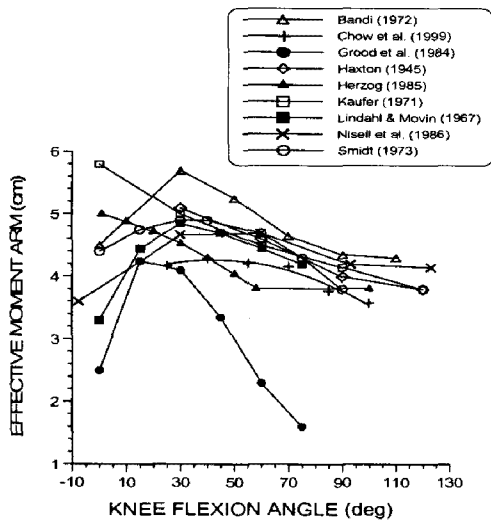


그림 5. 선행연구에서 밝혀진 대퇴사두근 유효 모멘트암의 수치 비교

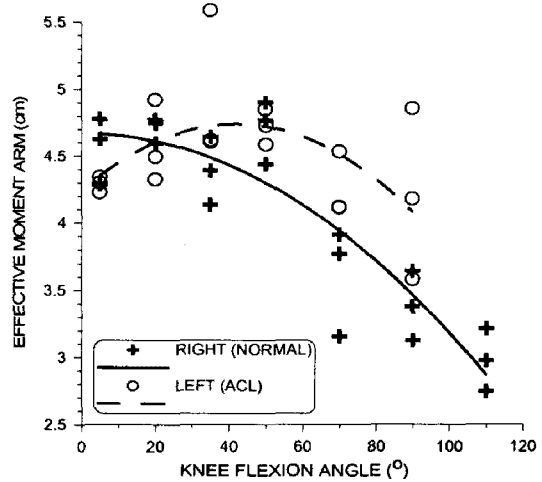


그림 6. 본 연구 피험자들의 대퇴사두근 유효 모멘트암

무릎 신전 운동 시 대퇴 사두근의 유효 모멘트암 길이는 슬개 인대 부하에 직접적인 영향을 미치며, 슬대퇴관절의 부하는 피험자에 따른 무릎관절 구조와 형태의 정확한 파악과 분석을 통하여 계산되어져야만 할 것이다. 본 연구의 결과, 여성 피험자에 있어 전방십자인대 수술이 시행되어진 슬관절과 정상적인 슬관절의 기하학적 구조에 명백한 차이가 있는 것으로 밝혀졌다. 이러한 이유에서 전방십자인대 수술이 유효 모멘트암의 길이 변화를 유발시키는 것으로 판단되어지며, 유효 모멘트암의 변화에 다양한 슬관절 수술이 어떻게 작용되어지는지에 대한 보다 정밀한 분석이 필요 되어질 것이다.

IV. 결 론

본 연구에서 전방십자인대 수술이 시행되어진 슬관절과 정상 슬관절의 d_e 값이 남성 피험자의 경우 유사한 것으로 밝혀졌다. 이에 반해 여성 피험자의 d_e 값은 전방십자인대 수술이 시행되어진 슬관절과 정상 슬관절 사이에 명백한 차이가 있는 것으로 나타났다. 전방십자인대 수술이 시행된 여성 피험자

의 슬관절에서 계산되어진 최대 d_e 값은 남성 피험자의 최대 d_e 값과 정상적인 슬관절의 최대 d_e 값 보다 크게 나타났다. 또한, 전방십자인대 수술이 시행된 모든 슬관절에서 최소 d_e 값이 정상 슬관절 보다 크게 나타났다. 무릎 굴곡 각도와 d_e 값의 관계에서, 전방십자인대 수술이 시행되어진 슬관절은 정상적인 슬관절 보다 d_e 값의 최대치에 뒤늦게 이르는 것으로 밝혀졌다. 정상적인 슬관절 보다 전방십자인대 수술이 시행되어진 슬관절에 있어 d_e 값의 분산이 크게 나타났으며, 이는 전방십자인대 수술이 개인 무릎관절의 기하학적인 구조 변화에 확연한 영향을 미치는 것으로 사료되어진다.

참 고 문 헌

- Bandi, W. (1972). Chondromalacia patellae und femoro-patellare arthrose. *Helvetica Chirurgica Acta*, 11, pp.1-70.
- Chow, J. W. (1999). Knee joint forces during isokinetic extensions)A case study. *Clinical Biomechanics*, 14, pp.329-338.
- Chow, J. W., Darling, W. G., & Ehrhardt, J. C. (1999a). Determining the force-length-velocity of the quadriceps muscles B I. Anatomical and geometric parameters. *Journal of Applied Biomechanics*, 15, pp.166-174.
- Grood, E. S. & Suntay, W. J. (1984). Biomechanics of the knee-extension exercise. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 66, pp.725-734.
- Haxton, H. A. (1945). The function of the patella and the effects of its excision. *Surgery, Gynecology and Obstetrics*, 80, p389-395.
- Herzog, W. (1985). *Individual muscle force prediction in athletic movements*. Unpublished doctoral dissertation. University of Iowa, Iowa City.
- Kaufner, H. (1971). Mechanical function of the patella. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 53, pp.1551-1560
- Lindahl, O. & Movin, A. (1967). The mechanics of extension of the knee-joint. *Acta Orthopaedic Scandinavica*, 38, pp.226-234.
- Nisell, R., Nemeth, G. & Ohlsen, H. (1986). Joint forces in extension of the knee-Analysis of mechanical model. *Acta Orthopaedic Scandinavica*, 57, pp.41-46.
- Smidt, G. L. (1973). Biomechanical analysis of knee flexion and extension. *Journal of Biomechanics*, 6, pp.79-92.