

Future Perspective on Objective Measurement of Knee Kinematics

김 성 환 연세의대 강남세브란스병원



AT A GLANCE

전방십자인대 손상은 슬관절의 인대 손상 중 많은 부분을 차지하며 전방십자인대 재건술 전후의 검사 또한 중요하다. 무릎 안정성의 회전 구성 요소를 고려한 Pivot shift 검사는 임상적으로 많은 도움이 될 것으로 생각되나, 검사의 복잡성으로 인해 여전히 측정자들 간의 차이가 나타나고 경험 및 숙련도 등에 의존적이나 정량적이며 표준화 할 수 있는 장치들의 개발과 적용이 멀지 않을 것으로 기대된다.

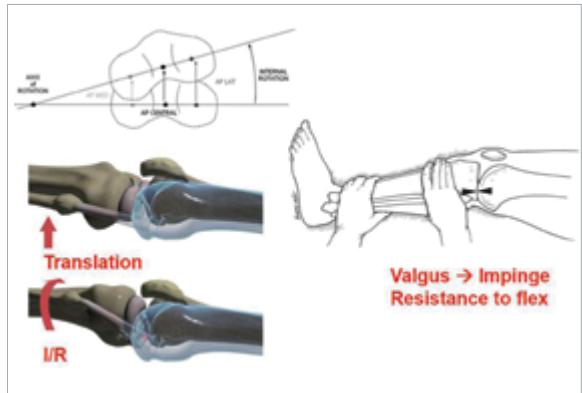


그림 1. 적색 화살표: 증가된 회전 불안정.

검정 화살표 머리: Galway and MacIntosh로 부터 기술된 외측 구획 충돌.

*출처: Lane CG, Warren R, Pearle AD. The Pivot shift. *J Am Acad Orthop Surg*. 2008;16(12):679–88.

| 서론 |

전방십자인대의 손상 정도와 수술의 결과를 측정하고 확인할 수 있는 재건술 전후의 검사는 임상적으로 필수적이다. 이 역할은 기존에는 Lachman 검사로 대표되는 전방 불안정에 집중되어 왔으나, 최근 Lachman 검사를 무릎 기능 결정을 위한 유일한 측정법으로 사용하는 것에 대하여 의문이 제기되고 있다.^{1, 2} 환자의 만족도, 기능적 불안정성, 연골 연화 및 골관절염의 발생 등은 운동학적인 슬관절의 회전 불안정과 밀접한 관련이 있고 이러한 회

전 구성 요소를 고려한 Pivot shift 검사의 임상적 중요성은 이미 알려져 왔다.² Pivot shift 검사는 무릎의 회전 불안정에 대한 가장 특이적인 검사이며, 슬관절을 신전시키고 경골에 외반력을 가하면서 축력과 내 회전을 가하여 서서히 굴곡 시켜 슬관절 외측을 아탈구 시켰다가 정복되었을 때 경골이 앞으로 튀어나오는 정도를 평가하는 검사다(그림 1).⁴ 무릎의 불안정에 대하여 glide(등급 1), locking(등급 2) 그리고 momentary locking(등급 3) 검사자의 주관적인 등급으로 작성된다.¹ 또한 Lachman 검사에 비해 복잡하고 역동적이고 다중 평면 조작법이며, 검사자들 간의 다른 검사 시행법,

평가 후의 등급을 정하는 등이 모두 주관적으로 해석되어³ 검사의 표준화가 어렵다는 점은 임상적으로 여전한 난제이다.²

| 본 론 |

최근의 연구들에서 Pivot shift 검사에 대하여 정량화 할 수 있는 장치 이용한 방법들을 소개하고자 한다.

1. 이미지 분석 시스템(Image analysis system – introducing Ipad application)⁵

무릎 관절의 측면 전위 평가를 위한 간단하고도 단순한 이미지 분석법은 최근 iPad에 애플리케이션을 설치하여 분석 할 수 있는 자동화된 응용 프로그램으로 개발되었고, 이는 전위에 대한 데이터를 거의 실시간의 비디오 이미지로 처리하여 적은 노력과 비용으로 Pivot shift 검사의 이미지 분석을 마칠 수 있다.

3개의 스티커를 외상과 Gerdy's 결절, 비골두의 해부학적 지표의 피부에 부착하여(그림 2-A), 전신 마취하에 Pivot shift 검사가 수행된다(그림 2-B). 검사자들은 Pivot shift 검사 결과를 등급화하여 평가하고 무릎의 외측면의 움직임을 촬영하여 iPad

애플리케이션으로 분석한다. 마커한 영역은 이미지에서 관심 영역으로 지정되고, 각 중심점의 위치는 각 비디오 프레임 내에서 랜드마크 지점으로 인식된다. 그리고, 대퇴골 전후(AP) 위치는 경골 수평선(Gerdy's 결절과 비골두의 연결선)과 외상과로부터 경골 수평선에 수직인 선과의 교차점을 Pivot point로 하여, Gerdy's 결절에서 교차점인 Pivot point까지의 거리에 대한 시간에 따른 대퇴 전후(AP) 위치가 표시된다(그림 2-C).

Pivot shift 시 정복이 될 때, 외측 경골 고평부는 대퇴 외과에 상대적으로 후방으로 움직이고 반대로 대퇴 외과는 상대적으로 외측 경골 고평부의 전방으로 움직인다. 그러므로 Pivot shift 전에 가장 후방의 대퇴 전후(AP) 위치와 Pivot shift 후의 가장 전방의 대퇴골 전후(AP) 위치를 외측 전위로서 계산한다. 종전에 Pivot shift 외측 전위 이미지 분석 기술은 컴퓨터를 사용한 노동 집약적인 이미지 분석 처리가 필요했으나 최근의 iPad를 이용한 이러한 이미지 분석은 프로그램화된 애플리케이션을 이용한 온인원 측정 장치로서 임상적으로 간편하고 경제적인 방법이 될 수 있을 것으로 보고 있다.



그림 2. (A) Pivot shift test 동안 무릎관절의 외측면의 3개의 마커는 무릎관절 외측에 골성(bony) 랜드마크에 부착된다. (B) Pivot shift test 동안 비디오 획득 과정. (C) 아이패드 애플리케이션 스크린샷.

*출처: Hoshino Y, Araujo P, Ahlden M, Samuelsson K, Muller B, Hofbauer M, et al. Quantitative evaluation of the Pivot shift by image analysis using the iPad. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2013;21(4):975–80.

2. 네비게이션 시스템(Navigation system)^{6, 7}

컴퓨터 네비게이션 시스템은 ACL 재건술 동안에 환자의 무릎 표면 형상의 상세한 삼차원 모델을 수술 중에도 확인하고, 마취하에 검사를 수행하면서 정확한 무릎 운동학에 대해 분석할 수 있다.

네비게이션 시스템은 우선 2개의 강체(rigid body)를 원위대퇴골과 근위경골에 각각 하나씩 삽입하고 각각 적외선 광학 로컬 라이저에 의해 추적될 수 있는 반사 마커를 이용하여 경골 결절, 경골의 전방 경계 및 경골고평부의 내측 및 외측지점으로 구성된 bony 랜드마크를 추적한다. 무릎 굴곡 0도 및 90도에서 무릎 위치와 0도와 90도 사이의 연속적인 환자 무릎 위치를 기록하고 이렇게 기록된 예비 데이터를 통해 환자의 무릎의 해부학적 모델이 생성된다. 이후 검사를 수행하는 동안 후속 데이터가 기록되며 무릎 운동의 정확한 동적 모델이 만들어진다. 네비게이션 시스템은 기구들과 대퇴골, 경골의 위치를 1-mm 미만 및 1도 미만으로 추적하는 카메라 시스템과 함께 고도의 정확도가 특징이다.

네비게이션 하 Pivot shift 검사는 ACL 재건술 전과 후에 시행될 수 있고(그림 3-A, B), 검사 값들은 전방 경골 전위, 경골 회전 범위 그리고 후방 전위 가속들을 12Hz의 샘플링 속도로 기록되며, 경골

의 전방-후방 전위 및 내-외측 회전의 크기 또한 자동으로 차트에 표시된다(그림 3-C). 무릎이 수동적으로 굴곡 됨에 따라 갑작스럽게 경골 고평부가 정복되는 Pivot shift 현상은 네비게이션 시스템에서 정량화되고 후방 경골 정복(posterior tibial reduction)으로써 측정 된다. 네비게이션 화면은 경골 전위에 대하여 수동적으로 무릎을 굴곡 하는 동안에 나타나는 전방경골전위를 나타내는 실선과 수동적으로 무릎을 신전하는 동안에 나타나는 경골 전위를 나타내는 점선으로 보인다(그림 3-D).

3. 전자기장 센서(Electromagnetic sensor)⁸

전자기 센서를 이용한 측정 시스템은 Pivot shift 검사가 시행되는 동안에 높은 샘플링속도(60Hz)로 6-방향 자유도를 측정하고 실시간으로 3차원 위치 변화를 모니터링하여 움직임의 가속을 계산할 수 있다.

이 시스템은 전자기장을 생성하는 송신기와 3개의 전자기 수신기로 구성되며, 두 개의 수신기는 경골과 대퇴골의 움직임 측정에 사용되고, 슬개골 10-cm 위에 허벅지 부위와 경골 결절 아래 7-cm 하퇴부위에서 brace에 고정된다. 특수 제작된 스타일러스에 부착된 세 번째 수신기는 6-방향 자유도 운동 측정을 수행하기 전에 해부학적 랜드마크를 디지털



그림 3. (A, B) 수술 중 네비게이션을 이용한 Pivot shift 검사. (C) Pivot shift 검사의 전형적인 양성소견의 예. (D) 네비게이션 시스템 도식.

*출처: (A) Lane CG, Warren RF, Stanford FC, Kendoff D, Pearle AD. In vivo analysis of the Pivot shift phenomenon during computer navigated ACL reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2008;16(5):487–92. (B, C, D) Maeda S, Tsuda E, Yamamoto Y, Naraoka T, Kimura Y, Ishibashi Y. Quantification of the Pivot-shift test using a navigation system with non-invasive surface markers. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2016;24(11):3612–8.

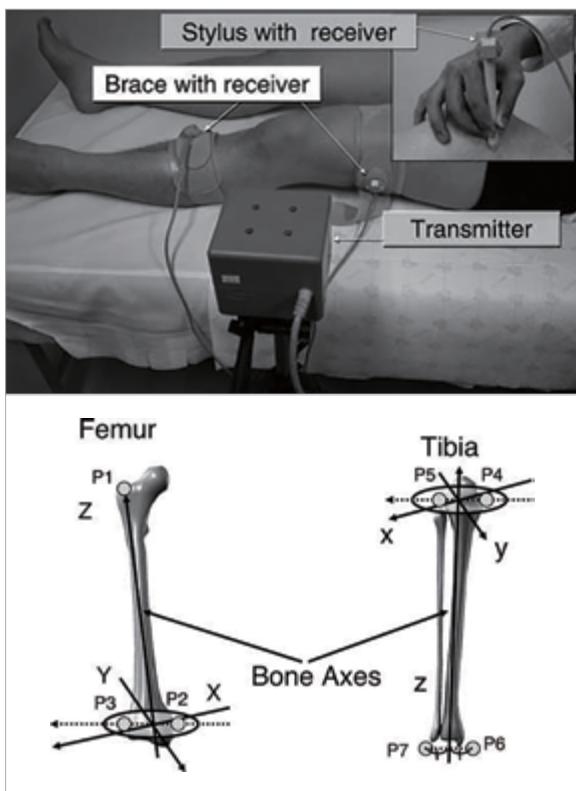


그림 4. (A) 전자기장 센서 시스템의 구성 (B) 좌표계 다이어그램. 대퇴골(P1-3)과 경골(P4-7)의 해부학적 랜드마크.

*출처: Hoshino Y, Kuroda R, Nagamune K, Yagi M, Mizuno K, Yamaguchi M, et al. In vivo measurement of the Pivot-shift test in the anterior cruciate ligament-deficient knee using an electromagnetic device. Am J Sports Med. 2007;35(7):1098–104.

화 하기 위해(그림 4-A), 스타일러스 팁과 제 3수신기 사이에서 위치 관계를 설정하여 지정된 위치를 정확히 판독할 수 있게 한다. 좌표계를 정하기 위한 7개의 해부학적 랜드마크들이 존재하며, 대퇴골의 해부학적 랜드마크는 대전자부(P1), 내상과(P2), 외상과(P3) 경골에서는 내측 측부 인대와 무릎 관절선 사이의 교차점(P4), 비골두(P5), 족근내과(P6), 족근외과(P7)로 구성된다(그림 4-B).

각 랜드마크에서 획득한 위치 데이터는 허벅지 또는 하지에 부착된 전자기 수신기의 상대적 위치로 변환되어 대퇴골 및 경골의 각각의 좌표계를 제공하는 데 사용된다. 경골이 외회전 된 상태에서 수동

굴곡 하는 동안 6-방향 자유도가 측정되고, Pivot shift 검사 동안 3차원 위치 변화를 비교하기 위한 참고 위치로써 사용된다. 종전의 다른 방법들과는 다르게 전자기 측정 시스템은 Pivot shift 검사 동안 경골 전방 전위뿐 아니라 경골 후방 가속의 증가를 동시에 측정하며 이를 정량적으로 평가할 수 있는 방법이다.

4. 관성센서(Inertia sensor)⁹

The Kinematic Rapid Assessment (KiRA) 3축 가속계는 Pivot shift 동안 대퇴골에 대한 경골의 가속도를 m/s^2 단위로 측정하여 그 결과를 정량화된 수치로 나타낼 수 있는 장치로 작고 착용하기가 용이하다. 관성 센서 시스템은 자이로스코프와 결합한 3축 가속도계를 사용한다(그림 5). 검사 중 피부 움직임에 의한 오차를 가장 줄일 수 있으면서 경골의 움직임에 가장 민감한 부위인 환자의 전방경골결절의 외측 및 gerdy's 결절 사이의 피부 위에 장치를 위치시킨다. 센서는 가속 모듈을 측정하고 이를 분석할 수 있는 프로그램으로 무선으로 데이터를 전송한다. 다음과 같은 값을 추출한다: amax : $a(\text{가속})$ 의 최대값 / amin : 최소값 / arange : amax



그림 5. 설치된 3축 가속계.

*출처: Helfer L, Vieira TD, Praz C, Fayard JM, Thaunat M, Saithna A, et al. Triaxial accelerometer evaluation is correlated with IKDC grade of Pivot shift. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2020;28(2):381–8.

- amin(가속 변화량). 이 시스템은 Pivot shift 하는 동안 경골 가속을 기록하며, 경골 가속 범위는 동작 중 최대 및 최소 경골 가속의 차이 값을 측정하게 된다.

| 결론 |

지난 수년간 Pivot shift 검사를 통해 무릎 관절의 역동적 이완 상태를 정량화하여 표준화 시키기 위한 방법들에 대하여 많은 발전이 이루어져 왔다.¹⁰ 그럼에도 불구하고 아직 임상적으로 Pivot shift의 등급과 완전히 부합하지 않는 점이나 여전히 측정자에 따른 일관성의 문제는 해결과제로 남겨져 있다. 그럼에도 불구하고 지속적인 연구와 임상적 적용을 통하여 이러한 문제들은 머지않아 해결될 수 있을 것으로 기대된다. Join⁺OS

References

- Naendrup JH, Patel NK, Zlotnicki JP, Murphy CI, Debski RE, Musahl V. Education and repetition improve success rate and quantitative measures of the pivot shift test. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2019;27(11):3418-25.
- S Ayeni OR, Chahal M, Tran MN, Sprague S. Pivot shift as an outcome measure for ACL reconstruction: a systematic review. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2012;20(4):767-77.
- Citak M, Suero EM, Rozell JC, Bosscher MR, Kuestermeyer J, Pearle AD. A mechanized and standardized pivot shifter: technical description and first evaluation. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2011;19(5):707-11.
- Lane CG, Warren R, Pearle AD. The pivot shift. *J Am Acad Orthop Surg.* 2008;16(12):679-88.
- Hoshino Y, Araujo P, Ahlden M, Samuelsson K, Muller B, Hofbauer M, et al. Quantitative evaluation of the pivot shift by image analysis using the iPad. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2013;21(4):975-80.
- Lane CG, Warren RF, Stanford FC, Kendoff D, Pearle AD. In vivo analysis of the pivot shift phenomenon during computer navigated ACL reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2008;16(5):487-92.
- Maeda S, Tsuda E, Yamamoto Y, Naraoka T, Kimura Y, Ishibashi Y. Quantification of the pivot-shift test using a navigation system with non-invasive surface markers. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2016;24(11):3612-8.
- Hoshino Y, Kuroda R, Nagamune K, Yagi M, Mizuno K, Yamaguchi M, et al. In vivo measurement of the pivot-shift test in the anterior cruciate ligament-deficient knee using an electromagnetic device. *Am J Sports Med.* 2007;35(7):1098-104.
- Helper L, Vieira TD, Praz C, Fayard JM, Thaunat M, Saithna A, et al. Triaxial accelerometer evaluation is correlated with IKDC grade of pivot shift. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2020;28(2):381-8.
- Lopomo N, Zaffagnini S, Amis AA. Quantifying the pivot shift test: a systematic review. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2013;21(4):767-83.