

# Single-Plane Fluoroscopy를 이용한 슬관절 동작분석시 다양한 투시각도에 따른 in vivo motion 측정 적용 타당성에 대한 연구

## Feasibility of Single-Plane Fluoroscopy Method for the Measurement of in vivo Knee Joint Motion with respect to Changes in Fluoroscopic Angle

\*서정희<sup>1,2</sup>, 전성철<sup>2,3</sup>, 정덕영<sup>2</sup>, 서상완<sup>4</sup>, 최화순<sup>4</sup>, #이성재<sup>1</sup>

\*J. H. Seo<sup>1,2</sup>, S. C. Jun<sup>2,3</sup>, D. Y. Jung<sup>2</sup>, S. W. Seo<sup>4</sup>, H. S. Choi<sup>4</sup>, #S. J. Lee(sjl@bme.inje.ac.kr)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>인제대학교 의용공학과, <sup>2</sup>(재)부산테크노파크 고령친화산업지원센터, <sup>3</sup>부산대학교 의과대학 재활의학과, <sup>4</sup>영남대학교 의료원 의료기기임상시험센터

Key words : knee joint, kinematics, single-plane fluoroscopy, edge to edge matching method, fluoroscopic angle

### 1. 서론

임상에서 사용되는 동작분석 방법으로 광전자 동작 추적방식(opto-electronic motion capture, MO-CAP)과 이중면 방사선 투시장비(dual-plane fluoroscopy, DF)를 이용한 기법이 사용되고 있다[1-3]. MO-CAP은 공간에 대한 제약이 없지만 마커를 피부에 부착하기 때문에 실제 골관절의 움직임 측정을 할 수 없는 단점이 있으며, DF는 방사선을 이용한 정확한 골관절의 움직임 측정이 가능하지만 장비의 특성상 공간의 제약을 받는 문제점이 있다[1-3].

최근, 단일면 방사선 투시(single-plane fluoroscopy, SF)만으로 골관절의 3차원운동을 측정하는 기법이 소개되고 있다. 이 기법은 SF 상의 이미지 윤곽과 CT 또는 MRI 영상에서 획득한 3차원 형상의 윤곽을 일치시키는 shape-matching method를 통해 in vivo 상태의 골관절 동작을 유효하게 측정할 수 있다고 최근 소개되고 있다[1,5]. 하지만, SF는 한 대의 fluoroscopy 사용으로 DF보다 낮은 방사선 조사량과 실험환경 구축비용의 절감이 가능한 장점이 있지만 측정 대상이 투시범위에서 벗어나는 out-of-plane 현상이 발생하는 문제점이 보고되었다[1,5,6]. Chen 등은 SF를 이용한 돼지사체의 턱관절 동작분석 연구에서 투시각도에 따라 out-of-plane 현상을 감소시킬 수 있을 것으로 보고하였으나, 투시각도를 30°이내의 범위에서 제한하여 SF의 사용에 한계를 보여주었다 [6].

본 연구에서는 보다 다양한 투시각도에서의 SF를 이용한 동작분석을 위해 frontal plane과 transverse plane 각도 변화에 따른 슬관절 모형골의 동작 측정을 실시하여 MO-CAP의 결과와 비교를 통해 투시각도별 동작측정 정확도를 조사하였다. 또한 이 결과를 실제 피검자의 슬관절 동작측정에 적용을 하여 in vivo 상태에서의 SF 투시각도 변화에 따른 적용 가능성을 확인하고자 하였다.

### 2. 재료 및 방법

#### 2.1 모형골을 이용한 동작 측정 정확도 분석

슬관절 모형골(Sawbones #3401/#3403, Pacific

Research Laboratories, USA)의 3D 스캔을 통해 SF의 동작측정에 사용되는 3D 형상모델을 획득하였다. 모형골은 6DOF 동작이 가능한 지그(정밀도: 회전:0.01°, 직선:10μm)와 결합하고, fluoroscopy를 이용한 슬관절 동작분석에 사용되는 9곳의 해부학적 주요 지점(femoral head, greater & lesser trochanter, lateral & medial femoral epicondyle, femoral articular surface, tibial tuberosity, lateral & medial tibial plateau)[2]과 지그의 받침판 가장자리 4곳에 마커(VACC-C1611N-Φ6.5mm, Oxford Metrics Inc., UK)를 부착하였다. 모형골이 부착된 지그는 full extension부터 deep flexion에 해당하는 굽힘(flexion-extension, F/E:0~140°)과 내회전(internal-external, I/E:±15°), 내외반(varus-valgus, V/V:±8.5°) 회전운동과 전후방(anterior-posterior, A/P:±4.5mm), 내외측(medial-lateral, M/L:3mm), 근원위(proximal-distal, P/D:±3mm) 직선운동 범위의 동작을 가했다.

모형골의 3차원 동작 측정을 위해 SF(ARCADIS Orbic, Siemens AG, Germany)와 MO-CAP(Vicon MX40, Oxford Metrics Inc., UK)의 동시 측정이 가능한 실험환경을 구축하고 SF의 투시각도 변화에 따른 측정 정확도 분석을 위해 5가지 투시각도를 설정하였다 (Table 1, Fig. 1). 투시방향당 5회씩 지그의 동작을 실시하여 MO-CAP을 통해 마커 좌표를 획득하고 SF를 이용하여 모형골의 투시영상을 저장하였다. MO-CAP을 통해 획득한 데이터는 후처리 프로그램 (Polygon, Oxford Metrics Inc., UK)을, SF의 데이터는 shape-matching open source program(JointTrack, Univ. Florida, USA)을 이용하여 투시영상과 3D 형상모델의 matching 후 동작 범위를 계산하였다[4]. 식(1)을 통해 SF와 MO-CAP의 측정오차(% error)를 산출하였다.

$$\% \text{ error} = \frac{|\text{SF 및 MO-CAP의 동작 측정 값} - \text{모형골의 동작 값}|}{\text{모형골의 동작 값}} \times 100 \quad (1)$$

Table 1 Fluoroscopic Angle

	#1	#2	#3	#4	#5
Frontal Plane Angle (deg)	0	0	0	45	45
Transverse Plane Angle (deg)	0	45	90	0	45

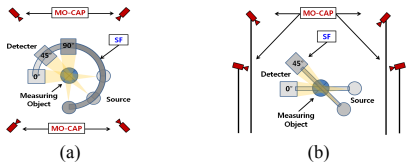


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set-up - (a) top view, (b) front view

2.2 피검자 동작측정을 통한 SF투시각도의 적용

정상인 피검자(남성, 31세, 88kg, 173cm)로부터 왼쪽 무릎의 CT 촬영을 통해 SF의 동작측정에 적용될 슬관절의 3차원 형상모델을 획득하였다. SF의 동작측정과 비교를 위해 MO-CAP의 측정용 마커를 plug-in-gait lower limb (Vicon marker placement system, Oxford Metrics Inc., UK) 방식으로 피검자의 하지 피부 표면에 부착하였다. SF 투시각도는 기존 연구에 적용되는 sagittal plane의 수직 방향(frontal & transverse plane angle:0°)의 투시각도[3-5]와 선행 실험에서 MO-CAP에 비해 측정 정확도가 높은 투시각도를 설정하였다. 피검자의 의자착석부터 기립까지의 운동을 3회 실시하고 SF와 MO-CAP을 통해 영상으로 데이터를 획득하였다. 동작의 측정값은 기립의 상태를 기준으로 하고 착석부터 기립까지의 1회 동작을 1 cycle로 설정하여 모형골 측정 실험과 동일한 방법으로 결과를 계산하였다.

3. 결과

3.1 모형골을 이용한 동작 측정 정확도 분석

모형골을 이용한 동작측정에서 MO-CAP의 결과는 2.4%(표준편차 1.3%), SF는 4.9%(표준편차 2%)의 측정오차를 보였다. 하지만 기존 연구의 SF 투시각도와 동일한 1번과 frontal과 transverse plane을 45도로 기울인 5번 투시각도에서 MO-CAP보다 높은 측정 정확도를 보였다(1.5%, 1.1%)(Fig. 2).

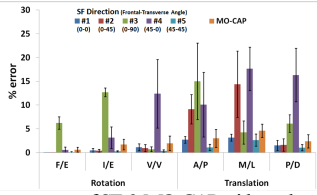


Fig. 2 System accuracy of SF & MO-CAP with sawbones specimens

3.2 피검자 동작측정을 통한 SF투시각도의 적용

1번과 5번의 SF 투시각도를 이용한 피검자의 슬관절 동작범위의 결과는 MO-CAP에 비해 F/E 회전운동에서 초반 약 15°의 차이를 보이지만 슬관절 동작운동의 50% 시점(flexion angle of 13.5°)이후부터는 서로 일치하는 결과가 나타났다. A/P 직선운동에서는 전 구간에서 약 2mm의 차이가 발생하였다(Fig. 3). 1번과 5번의 투시각도를 이용한 결과를 비교해 볼 때 동작범위 결과는 회전운동에서 약 12°와 직선운동에서 약 0.9mm 내외의 차이를 보여 in vivo 동작분석 결과가 서로 상당히 일치하는 경향을 확인하였다.

4. 토의 및 결론

모형골을 이용한 동작 측정 정확도 결과를 통해 기존 연구에서 사용되는 sagittal 방향의 SF 투시각도와

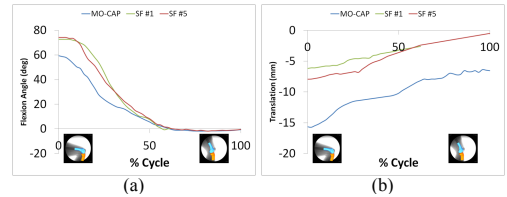


Fig. 3 Motion in the normal knee joint during rising from a seated position - (a) F/E rotation, (b) A/P translation

frontal과 transverse plane을 45°씩 기울인 투시각도는 MO-CAP에 비해 상대적으로 우수한 결과가 도출되어 슬관절의 동작 분석에 충분히 적용 가능한 것으로 판단되었다.

피검자의 착석부터 기립까지의 슬관절 운동분석에서는 sagittal plane에서 MO-CAP과 SF 결과가 서로 차이를 보였다. 주로 flexion angle이 큰 착석에 가까운 구간(flexion angle >59.5°)에서 MO-CAP의 경우 상대적으로 과소 측정되었지만 flexion에서 extension으로 이어지는 동작의 50% 시점(flexion angle <13.5°)이후부터는 이러한 경향이 감소되어 두 방식으로부터 측정된 슬관절 운동결과가 거의 일치하였다. 이러한 경향은 MO-CAP의 단점으로 지적된 마커부착이 슬관절 골 표면이 아닌 피부상에 부착되었고 또한 skin movement artifact(SMA) 자체 등의 이유에서 기인된 것으로 사료된다(Fig. 3a)[2,3]. AP 직선운동에서 역시 이러한 경향이 관찰되었다(Fig. 3b)[2,3]. 따라서, 모형골의 동작 측정의 경우 MO-CAP은 모형골의 표면에 부착된 마커를 측정하기 때문에 SF보다 정확한 측정결과를 도출할 수 있는 반면 실제 피검자에 적용한 경우 SMA로 인해 정확한 관절의 동작측정이 불가능하기 때문에 골관절의 동작 측정에는 SF를 이용한 방법이 보다 더 유효한 결과를 가져올 것으로 판단되었다[2,3].

결론적으로, SF를 이용한 실제 피검자의 동작분석에서 기존 연구에서 사용되었던 sagittal plane에 한정된 투시각도 뿐만 아니라 frontal과 transverse plane을 45°로 기울인 oblique한 투시각도 역시 충분히 정확성을 가지고 in vivo 상태의 슬관절 운동을 측정할 수 있다는 가능성이 제시되었다.

참고문헌

- Li G, Velde SK, Bingham JT, "Validation of a non-invasive fluoroscopic imaging technique for the measurement of dynamic knee joint motion" J Biomech., **41**, 1616-1622, 2008
- Cappozzo A, Catani F, Croce UD, Leardini A, "Position and orientation in space of bones during movement: anatomical frame definition and determination" Clin. Biomech., **10**, 171-178, 1995
- Tsai T, Lu T, Kuo M, Lin C, "Effects of soft tissue artifacts on the calculated kinematics and kinetics of the knee during stair-ascent", J Biomech., **44**, 1182-1188, 2011
- Acker S, Li R, Murray H, John P, Banks S, Mu S, Wyss U, Deluzio K, "Accuracy of single-plane fluoroscopy in determining relative position and orientation of total knee replacement components", J Biomech., **44**, 784-787, 2011
- Yamazaki T, Watanabe T, Tomita T, Sugamoto K, Ogasawara M, Sato Y, Yoshikawa H, "3D kinematics of normal knee using X-ray fluoroscopy and CT images", IFMBE Proceeding, **14**, 2793-2796, 2007
- Chen C, Lin C, Chen Y, Lu T, "Accuracy assessment of a marker-cluster registration method for measuring temporomandibular kinematics using cone-beam computerized tomography with fluoroscopy", J Med. Biol. Eng., Articles in Press, May 2012