

환자 맞춤형 유한요소 모델을 이용한 비구 주위 절골술의 유효성 평가

Biomechanical evaluation of periacetabular osteotomy using patient-specific finite element models

*박성재¹, 이경진², 권순용², #이성재¹

*S. J. Park¹, K. J. Lee², S. Y. Kwon², #S. J. Lee (sjl@bme.inje.ac.kr)¹

¹인제대학교 의용공학과, ²카톨릭대학교 의과대학 정형외과

Key words : Periacetabular Osteotomy (PAO), Finite Element Analysis, Hip Dysplasia

1. 서론

고관절 이형성증 (hip dysplasia)은 비구 변형, 대퇴골두의 거동 범위 감소, 대퇴의 과도한 전경, 대퇴 경부의 단축 등의 형태학적 이상으로 인해 비정상적인 관절 응력, 관절 연골의 퇴행 등이 발생하고, 이는 고관절 골관절염을 유발한다고 보고되고 있다[1]. 이러한 고관절 이형성증은 수술적 치료를 필요로 하며, 청소년기나 젊은 성인 환자의 경우 고관절 전치환술보다 고관절을 보존할 수 있는 비구 주위 절골술 (periacetabular osteotomy)의 시술을 많이 받는 실정이다[2].

비구 주위 절골술은 대퇴골두의 고관절 중심부로의 내측화 (medialization)를 통해 대퇴와 관절 중심 간의 거리를 줄여 관절에 가해지는 하중을 감소시키고, 비구 주위 좌골과 장골을 절골하여 분리된 비구는 대퇴골두를 기준으로 내·외측의 3차원 회전[Fig.1-(a)]을 통해 대퇴골두 상단과 비구의 접촉 면적을 넓힘으로써 접촉면의 응력 분포가 분산되어 고관절 골관절염의 발생을 지연, 방지하는 효과가 있다고 알려져 있다[2].

비구 주위 절골술의 유효성을 확인하는 임상적 평가 방법으로는 x-ray, 컴퓨터 단층촬영 등의 영상 자료를 이용하여 정면 관점 (frontal view)에서의 수직선에 대한 대퇴골두 중심과 비구 가장자리의 각도(center-edge angle, CEA)를 측정하여 비구 가장자리와 맞닿는 대퇴골두의 위치에 따라 임상적 활동에서의 대퇴골 거동 범위를 2차원적으로 확인할 수는 있지만, 시술에 따른 대퇴골두-비구 접촉면의 접촉 압력 및 면적, 내부 응력 변화를 정량적으로 확인하기는 어렵다.

따라서 본 연구에서는 임상적 평가 방법을 통해 유효성을 확인하고, 시술 전·후의 환자 맞춤형 3차원 유한요소 모델 구축을 통해 대퇴골두-비구 접촉면의 생체역학적 변화를 정량적으로 분석하여 비구 주위 절골술의 유효성을 평가하고자 한다.

2. 대상 및 방법

비구 주위 절골술의 유효성 평가를 위해 고관절 이형성증 (hip dysplasia) 환자 (여성, 나이; 42세, 체중; 52 kg)의 시술 전·후의 컴퓨터 단층촬영 자료 (1mm 간격)를 바탕으로 3차원 재건 프로그램 (Mimics v14.1, Materialise, Belgium)을 이용하여 시술 전·후의 임상적 내측화 및 비구 회전 정도의 측정방법인 대퇴골두와 치골 결합부 사이의 거리 (distance between symphysis pubis and femoral head, DBSPFH)와 고관절 경사각도 (hip inclination angle)를 측정하였고, 이러한 변화에 따른 대퇴골의 거동범위 평가를 위해 CEA를 측정하였다. 환자 맞춤형 3차원 유한요소 모델은 시술 부위인 우측만을 고려하여 골반과 대퇴골 모델을 구축하였으며, 대퇴골의 경우 대퇴골두 상부 끝부분에서 120 mm 아래까지 구축하였다 [Fig.1(b)(c)].

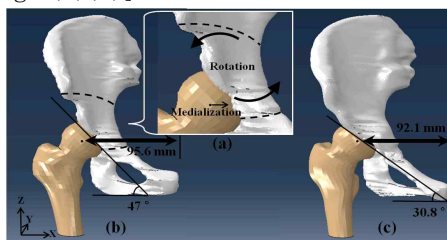


Fig. 1 Frontal view of a developed patient-specific 3-D FE model of right hip and showed anatomical parameters (hip inclination angle in normal line, DBSPFH in bold line, periacetabular osteotomies in broken line). (a) The enlarged view of the acetabular fragment and femoral head. Arrows indicate how fragment can be moved to improve femoral head coverage (lateral rotation in upper curved arrow, medial rotation in lower curved arrow, medialization of the femoral head to the hip center in horizontal arrow). (b) pre-operative and (c) post-operative model.

대퇴골과 골반은 사면체와 육면체 요소로 시술 전·후 각각 491,574, 453,112 개의 요소와 97,171, 100,964 개의 절점으로 구성하였다. 물성치는 피질골 ($E = 17 \text{ GPa}$, $\nu = 0.3$)과 해면골 ($E = 100 \text{ MPa}$, $\nu = 0.3$)을 문헌[3,4]에 근거하여 적용하였다. 대퇴골두-비구 접촉면은 관절 운동을 구현하기 위해 "general" contact condition을 적용하였다.

장골 상부와 치골 결합부의 절점을 모든 방향에 대해 구속하였고, 하중조건은 single-legged stance를 가정하여 1,201 N (체중의 231%)을 대퇴골 간부 절점에서 분포하중으로 인가하였다[5].

범용 유한요소해석프로그램 (ABAQUS v6.11, SIMULIA, USA)을 이용하여 환자 맞춤형 시술 전·후 3차원 유한요소 모델의 대퇴골두-비구 접촉면의 최대 접촉압력 (peak contact pressure) 및 접촉 면적 (contact area), PVMS (peak von Mises stress)를 분석하였다.

3. 결과

시술 후, 비구 주위 절골술을 통해 DBSPFH는 3.7% 감소 (95.6 mm → 92.1 mm)하였으며, 고관절 경사 각도는 34.5% 감소 ($47^\circ \rightarrow 30.8^\circ$)함에 따라 CEA는 시술 전 대비 126.2% 증가 ($12.2^\circ \rightarrow 27.6^\circ$)하여 정상범위 ($20^\circ \leq \text{CEA} \leq 30^\circ$)내로 복원되었음을 확인하였다. 대퇴골두-비구의 접촉 면적은 22.7% 증가하였고, 대퇴골두에서 최대 접촉압력은 68% ($14.35 \text{ MPa} \rightarrow 4.6 \text{ MPa}$) 감소하였다. 반면에 PVMS는 비슷한 값을 보였지만, 시술 전 비구 가장자리와의 접촉면에 집중되었던 응력 분포는 시술 후 접촉면적의 증가로 인해 분포가 넓어짐을 확인하였다[Fig.2,3].

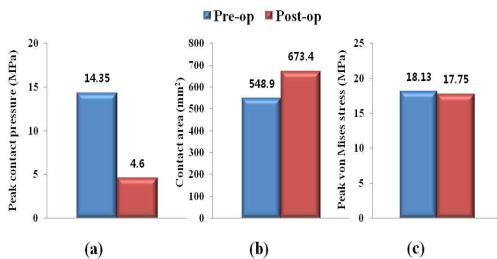


Fig. 2 Comparison between pre-operative and post-operative models. (a) peak contact pressure, (b) contact area, (c) peak von Mises stress.

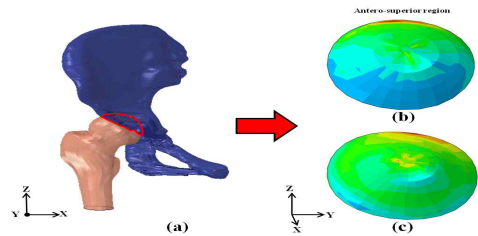


Fig. 3 Stress distribution of the femoral head. (a) contact area of the femoral head, (b) pre-operative, and (c) post-operative model.

4. 결론

본 연구는 한 명의 환자에 대한 맞춤형 유한요소법을 통하여 시술효과를 정량적으로 확인하고자 하였다. 연구 결과에 따라 시술 후, 대퇴골두와 비구 가장자리의 제한되었던 CEA가 증가함에 따라 거동 범위의 회복이 예상되며 대퇴골두에서 최대 접촉압력 감소, 넓어진 응력 분포 및 접촉면의 증가로 인해 대퇴골두-비구 접촉면의 역학적 환경이 향상되는 생체역학적 변화를 확인하였다. 따라서 비구 주위 절골술은 고관절 이형성증 환자의 치료에 있어 임상적으로 양호한 결과를 나타낼 것으로 예상된다.

참고문헌

1. M. Fujii, Y. Nakashima, T. Yamamoto, T. Mawatari, G. Motomura, A. Matsushita, S. Matsuda, S. Jingushi, Y. Iwamoto, "Acetabular Retroversion in Developmental Dysplasia of the Hip", *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 92, 895-903, 2010
2. S. Steppacher, M. Tannast, R. Ganz, K. Siebenrock, "Mean 20-year Followup of Bernese Periacetabular Osteotomy", *Clin Orthop Relat Res*, 466, 1633-1644, 2008
3. M. Dalstra and R. Huiskes, "Load Transfer Across the Pelvic Bone", *J of Biomechanics*, 28, 715-724, 1995
4. A. Anderson, B. Ellis, S. Maas, C. Peters, J. Weiss, "Validation of Finite Element Predictions of Cartilage Contact Pressure in the Human Hip Joint", *J Biomech Eng*, 130, 2008
5. G. Bergmann, G. Deuretzbacher, M. Heller, F. Graichen, A. Rohlmann, J. Strauss, G. N. Duda, "Hip contact forces and gait patterns from routine activities", *J of Biomechanics*, 34, 859-871, 2001