

# 유한요소해석을 이용한 이형성 고관절 절골술에 대한 수술예비계획 Pre-operative Planning of Osteotomy for Dysplastic Hip Joint Using Finite Element Analysis

\*박원만<sup>1</sup>, #김윤혁<sup>2</sup>, 김경수<sup>3</sup>, 조태준<sup>4</sup>, 오택열<sup>5</sup>

\*W. M. Park<sup>1</sup>, #Y. H. Kim(yoonhkim@khu.ac.kr)<sup>2</sup>, K. Kim<sup>3</sup>, T. J. Cho<sup>4</sup>, T. Y. Oh<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 경희대학교 기계공학과, <sup>2</sup> 경희대학교 테크노공학대학, 산학협력기술연구원,  
<sup>3</sup> 경희대학교 자연과학융합연구원, <sup>4</sup> 서울대학교 의과대학 정형외과교실, <sup>5</sup> 경희대학교 테크노공학대학

Key words : pre-operative planning, finite element analysis, hip joint surgery

## 1. 서론

유한요소해석은 사체를 이용한 실험과 더불어 생체역학 분야의 주된 연구방법 중 하나로 지난 수십 년간 생체역학 분야에서 사용되어 왔다[1, 2, 3]. 사체를 이용한 실험은 정량적 결과의 신뢰도는 높으나 실험을 통해 얻을 수 있는 데이터의 종류에 한계가 있고, 사체의 상태에 따라 결과의 변동폭이 심하며[1, 2], 하나의 사체로 한번의 실험을 할 수 밖에 없어 다양한 수술법에 대한 상대적인 비교에는 활용이 적합하지 않다. 이에 반해 유한요소해석은, 비록 정량적인 해석 결과의 신뢰도가 실험에 비해 상대적으로는 떨어지나, 컴퓨터 하드웨어 및 응용프로그램의 발전으로 결과의 신뢰도가 향상되었다. 뿐만 아니라 응력, 압력, 변형, 힘 등의 다양한 역학적 요소들의 변화를 관찰할 수 있으며, 동일한 모델을 이용하여 다양한 해석을 할 수 있어 상대적인 비교에 유리하다.

일반적인 정형외과 수술에서는 수술에 앞서 X-ray, CT 등의 이미지를 이용한 수술예비계획을 수행하게 되며, 이는 수술의 성공 여부를 결정하는 중요한 과정 중 하나이다. 수술예비계획에서는 진단된 환자의 질환에 적합한 수술방법을 결정하고, 가상으로 수술을 수행함으로써 수술 후 골격의 형태 변화를 관찰하게 된다. 만약 유한요소해석을 이용한다면 수술예비계획 후 환자의 골격 형상 변화뿐 아니라, 골격 형상의 변화가 접촉압력, 압력분포, 내부응력과 같은 역학적 인자에 미치는 영향을 분석할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여 이형성 고관절의 절골술 전후의 접촉압력, 응력 등을 정량적으로 분석하였다. 성장기 어린이들의 고관절에서 발생할 수 있는 정형외과 질환인 Legg-Calve-Perthes(LCP) 병 환자와 대퇴골두골단분리증(SCFE) 환자의 3 차원 유한요소모델을 개발하였다. 개발한 모델에 가상 수술을 적용하여 수술 후 모델을 개발하고, 수술 전후의 임상적 요소의 변화뿐 아니라 생체역학적 요소의 변화를 살펴보았다. 이를 통해 각각의 질환에 대해 선택된 수술 방법들의 생체역학적 타당성을 분석하였다.

## 2. 재료 및 방법

본 연구에서는 3 명의 LCP 병 환자와 1 명의 SCFE 환자에 대해 연구를 수행하였다. 각각의 환자에 대해 2mm 간격으로 촬영한 CT 이미지를 이용하여, 각각의 유한요소해석 모델을 개발하였다. 이때, 고관절에서 골반 및 대퇴골은 관절 연골에 비하여 상대적으로 높은 탄성계수를 가지므로, 대부분의 변형은 연골에서 발생한다. 뿐만 아니라, 골반 및 대퇴골 내부의 응력은 관심분야가 아니므로, 본 연구에서는 연골 이외의 모든 부분들을 길질뼈로 가정하여 모델을 단순화하였다. 골반의 비구와 대퇴골의 대퇴골두 사이는 마찰계수 0.02 를 가지는 3 차원 비선형 접촉조건을 부가하였다.

3 명의 LCP 병 환자에 대해서는 비구의 공간을 넓히는 수술인 선반형성술이, SCFE 환자에 대해서는 대퇴골두 방향을 틀어주는 돌기사이 절단술(intertrochanteric osteotomy)이

각각 정형외과 임상전문의에 의해 선택되어 사용되었다(그림 1). CT 를 이용하여 개발한 수술 전 유한요소모델에 각각의 수술법을 적용하여 수술 후 유한요소모델을 개발하였다. 이때, 대퇴골두와 비구를 덮고 있는 연골은, MR 이미지로부터 두께를 측정하여 개발되었다. 이때, 기존의 연구에서 알려진 길질뼈(Young's modulus : 17GPa, Poisson's ratio : 0.3)와 연골(Young's modulus : 15MPa, Poisson's ratio : 0.45)의 물성치가 각각 사용되었다[4].

LCP 병 환자에게 수행한 선반형성술은 비구와 대퇴골두 사이의 접촉면적을 넓혀 접촉압력을 낮추는 것이 주된 목적이므로 역학적 인자로서 연골의 응력, 접촉압력, 접촉면적 등을, 임상에서 접촉면적을 판단하는 기준이 되는 Center-edge(CE) 각을 임상적 인자로 각각 살펴보았다. 이에 반해 SCFE 환자에게 수행한 돌기사이 절단술의 경우, 접촉압력을 유지한 상태에서 고관절의 운동범위를 높이기 위하여 사용된 수술방법이다. 따라서 생체역학적 인자인 연골에 걸리는 접촉압력과 응력의 수술 전후 변화량을 관찰하였다.

유한요소해석에서 대퇴골의 원위부는 3 방향의 병진 및 회전에서 완전히 구속하였으며, 대퇴골은 수직방향의 병진 운동만이 가능하도록 구속하였다. 한발로 서 있는 상태에서의 힘 평형 방정식을 이용하여 고관절의 관절력의 크기와 방향을 계산하였다[5]. 계산된 힘을 골반에서 대퇴골두 방향으로 모멘트를 발생시키지 않는 골반의 위치에 가하였다(그림 2).

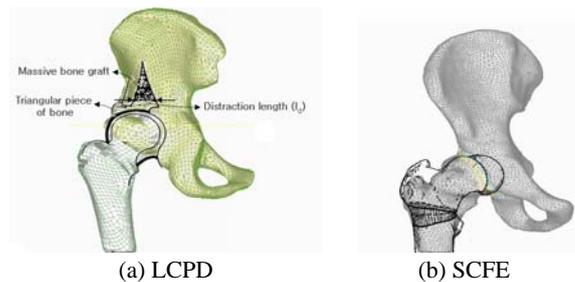


Fig. 1 Pre-operative planning for (a)LCPD and (b)SCFE patient

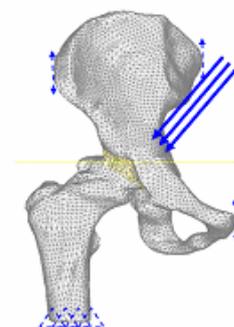


Fig. 2 Loading and boundary conditions for finite element analysis

Table 1. Anatomical and mechanical factors in pre- and post-operation

Patient (Disease)			Pre-Op.	Post-Op.
Patient 1 (LCPD)	Anatomic parameter	CE angle (°)	3.4	44.2
		Maximum von-mises stress (MPa)	0.55	0.38
	Mech. parameter	Maximum contact pressure (MPa)	2.30	1.60
		Contact area (mm <sup>2</sup> )	1092.8	1399.7
Patient 2 (LCPD)	Anatomic parameter	CE angle (°)	8.7	37.4
		Maximum von-Omises stress (MPa)	1.39	1.14
	Mech. parameter	Maximum contact pressure (MPa)	6.05	4.51
		Contact area (mm <sup>2</sup> )	1536.1	1994.1
Patient 3 (LCPD)	Anatomic parameter	CE angle (°)	20.0	39.8
		Maximum von-mises stress (MPa)	0.91	0.73
	Mech. parameter	Maximum contact pressure (MPa)	2.53	1.81
		Contact area (mm <sup>2</sup> )	1195.2	1891.4
Patient 4 (SCFE)	Mech. parameter	Maximum von- mises stress (MPa)	0.54	0.54
		Maximum contact pressure (MPa)	2.39	2.43

3. 결과 및 고찰

LCP 병의 원인은 아직까지 명확하게 밝혀지지는 않았다. 하지만, 고관절 내의 비정상적인 높은 압력으로 대퇴골두의 무혈성 괴사가 발생하며, 혈관이 재생되는 동안 뼈가 연하여 압력이 가해지면 고관절이 쉽게 손상 받게 된다는 설이 가장 유력하게 받아들여지고 있다. 이는 대퇴골두에 걸리는 접촉압력 및 응력은 고관절의 생체역학적 평가에 있어 중요한 의미를 가짐을 의미한다.

LCP 병 환자인 환자 1 과 2 는 수술 전 3.4° 와 8.7° 에 불과하던 CE 각은 각각 44.2° 와 37.4° 로 개선되었으며, 이는 정상 CE 각 범위(20° -25° 이상)에 포함되는 범위이다. 환자 3 역시 수술 전 20° 에서 수술 후 39.8° 로 CE 각의 개선이 이루어 졌다. 고관절에 걸리는 최대 응력은 환자 1, 2, 3 에서 31%, 18%, 19%, 최대 접촉압력은 30%, 25%, 29% 각각 감소하였다. 이러한 응력 및 접촉압력의 감소는 선반형성술에 의해 증가한 CE 각과, 각각 28%, 30%, 58% 증가한 접촉면적에 기인한 것으로 판단된다(표 1).

SCFE 환자인 환자 4 의 최대 접촉압력 및 최대 응력은 수술 전과 후 큰 차이를 보이지 않았다. SCFE 에 대한 돌기사이 절단술의 주된 목적은 환자 고관절의 운동범위 증가에 있다. 따라서 본 연구에서 수행한 돌기사이 절단술은 대퇴골두 부분에서 수술 전과 유사한 최대 접촉압력과 최대 응력을 보이면서 고관절의 운동범위를 높일 수 있는 수술방법으로 판단되었다.

4. 결론

본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여 LCP 병 환자와

SCFE 환자에 대한 절골술이 환자의 고관절에 미치는 생체역학적 영향을 분석하였다. 각각의 환자들의 수술 전후 대퇴골두에 걸리는 접촉압력을 분석하여, 각각의 수술이 절환의 생체역학적 개선에 미치는 영향을 정량적으로 예측할 수 있었다. 유한요소해석을 통하여 확인한 최대 접촉압력, 최대 응력, 접촉면적, 접촉분포 등의 결과를 통하여 고관절에 대한 수술예비계획의 적절성을 판단할 수 있었다. 이를 이용한다면, 잘못된 수술 예비계획에 대한 수정 방향에 대해서도 제시할 수 있을 것이라 생각한다.

고관절 질환은 환자의 상태에 따라 수술적 치료에 많은 제약을 받는다. 본 연구의 결과를 이용하고 향후 최적화 기법 등을 적용한다면, 환자의 상태에 따른 제약된 범위 내에서 수행 가능한 여러 가지 수술법들 중 최적의 수술 방법을 제시할 수 있을 것이라 생각한다. 또한 선택된 수술에서 환자에게 가장 적합한 생체역학적 인자들을 제시할 수 있을 것이라 생각한다.

후기

본 연구는 한국과학재단 특장기초연구(R01-2006-000-11209-0)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Natarajan, R.N., Garretson, R.B., Biyani, A., Lim, T.H., Andersson, G.B.J., and An, H.S., "Effects of Slip Severity and Loading Direction on the Stability of Isthmic Spondyloisthesis: A Finite Element Model Study", *Spine*, **28**, 1103-1112, 2003.
- Natarajan, R.N., and Andersson, G.B.J., "The Influence of Lumbar Disc Height and Cross-sectional Area on the Mechanical Response of the Disc to Physiologic Loading", *Spine*, **24**, 1973-1881, 1999.
- Argoubi, M., and Shirazi-Adl, A., "Poroelastic Creep Response Analysis of a Lumbar Motion Segment in Compression", *Journal of Biomechanics*, **29**, 1331-1339, 1996.
- Wei, H.W., Sun, S.S., Jao, S.H., Yeh, C.R. and Cheng, C.K., "The Influence of Mechanical Properties of Subchondral Plate, Femoral Head and Neck on Dynamic Stress Distribution of the Articular Cartilage", *Med. Eng. Phys.*, **27**, 295-304, 2005.
- Genda, E., Iwasaki, N., Li, G., MacWilliams, B. A., Barrance, P. J., and Chao, E.Y.S., "Normal hip joint contact pressure distribution in single-leg standing effect of gender and anatomic parameters", *J. Biomech.*, **34**, 895-905, 2001.