

## 최소침습술을 위한 고관절 메커니컬 스템의 개발

이성현\* · 배지용\* · 전인수\*\*

\* 전남대학교 기계공학부

### Development of Hip Joint Mechanical Stem for Minimally Invasive Surgery

Sunghyun Lee\*, Ji-yong Bae\* and Insu Jeon\*\*

\* School of Mechanical Engineering, Chonnam Nat'l Univ.

(Received March 25, 2013 ; Revised April 10, 2013 ; Accepted April 18, 2013)

**Key Words:** Finite Element Analysis(유한요소해석), Minimally Invasive Surgery(최소침습술), Mechanical Stem(메커니컬 스템), Total Hip Joint Replacement(고관절 전치환술)

**초록:** 고관절 전치환술은 대퇴골두와 비구 부분이 손상되어 제 기능을 하지 못하였을 때, 인공 고관절로 대체하는 수술로서 인체에는 많은 양의 절개를 필요로 하며 장기간의 회복시간과 재활시간을 필요로 한다. 최소침습술은 환자에게 흉터와 근육절개를 최소화하고, 회복시간을 단축하여 미관상 흉터가 적어 가장 선호되는 수술 방법이다. 이 논문에서는 최소침습술이 가능한 메커니컬 스템(Mechanical stem)을 기어의 원리를 이용하여 개발하였다. 재치환술을 할 경우에는 스템 전체를 교체할 필요 없이 일부 부품만을 교체하여 수술 시간을 단축할 수 있도록 설계하였으며, 아크릴 소재로 모형을 제작하여 작동에 문제가 없는 것을 확인하였다. 3D Bio-CAD 모델링 기법을 통하여 메커니컬 스템의 기하학적 모델링을 하였다. 실험 대상자의 고관절 부위는 컴퓨터 단층촬영 영상데이터를 기반으로 3차원 재구축을 하였고, 가상 시술 환경 조건에서 몸무게보다 더 과중한 하중을 적용하여 메커니컬 스템의 안전성을 유한요소해석으로 확인하였다.

**Abstract:** Conventional total hip joint replacement(THR) surgery requires a long incision and long rehabilitation time. The stem used in THR is inserted into the cancellous bone of the femur where it plays the role of the artificial joint. Minimally invasive surgery(MIS) has been devised to reduce muscle damage to patients. In this study, a mechanical stem was developed on the basis of MIS to reduce the incision length through the principle of the gear. The mechanical stem consists of six components. A prototypical model for a mechanical stem was fabricated using an acryl-based polymer, and its workability was confirmed. To actualize the mechanical stem, a three-dimensional Bio-CAD modeling technique was applied. The hip joint area based on computed tomography(CT) was reconstructed. The safety of the mechanical stem by applying more load than the weight of a man under virtual surgery environment conditions was confirmed by finite element analysis.

### 1. 서론

고관절 전치환술(total hip joint replacement, THR)은 주로 대퇴골두와 비구 부분에 질병이나 사고로 인한 치명적인 손상이 발생되어 제대로 된 기능을 수행하지 못하였을 때, 인공 고관절로 대체하는 수술을 말한다. 산업과 의학의 발달로 인한 고령화에 의해 그 수요는 지속적으로 증가하고 있는 추세이며, 이에 따라 THR의 수술방법도 다양하게 발전해가고 있다.

일반적인 THR 수술법은 20 cm 이상 절개하여

인공관절을 삽입하기 때문에, 근육, 피부, 힘줄 등의 손상범위가 넓다. 이는 수술 후 장기간의 회복기간과 재활기간이 필요로 하며, 수술흉터도 크게 남게 된다.<sup>(1)</sup> 하지만, 최근에는 이러한 손상을 최소화 하기 위해, 작은 크기로 절개하여 수술이 가능한 최소침습술(minimally invasive surgery, MIS)이 각광받고 있다.

총 절개길이가 10 cm 미만인 MIS는 절개부위 또는 접근 방법에 따라, 단일 절개법<sup>(2-5)</sup>과 두 부위 절개법<sup>(6,7)</sup>으로 나뉜다. 단일 절개는 전외측,<sup>(2)</sup> 후방 또는 후외측 도달법<sup>(3-5)</sup> 등이 있으며, 비구부 노출과 비구컵 삽입을 위한 전방절개와 대퇴부 노출 및 대퇴 스템(femoral stem) 삽입을 위한 후

† Corresponding Author, [i\\_jeon@chonnam.ac.kr](mailto:i_jeon@chonnam.ac.kr)

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

방절개로 구성되는 두 부위 절개법은 Berger<sup>(6)</sup>와 Yoon 등<sup>(7)</sup>의 연구에 소개된 바 있다.

하지만, MIS에도 불구하고 현재 THR에 사용되고 있는 대부분의 스템은 일체형 방식(unitary stem)이며, 이것은 스템을 삽입하기 위해서 아직도 상당량 이상의 절개가 필요하다는 의미이다. 근래에는 다양한 방식의 스템(stem)이 개발되고 있지만 여전히 절개의 양을 줄이는 데에는 부족한 점이 있다.<sup>(8,9)</sup>

따라서, 본 연구에서는 모듈러 타입으로 길이 조절이 가능하도록 설계되어 최소침습술에 적합한 메커니컬 스템(mechanical stem)을 개발하였다. 이로 인하여 재치환술에서 스템을 교체하는 과정에 발생할 수 있는 위험성을 최소화할 수 있다. 또한, RP(rapid prototyping) 장비를 이용하여 실물 크기와 동일한 모형을 제작하여 스템의 작동 상태와 MIS에 대한 적합성을 확인하였다. 최종적으로 유한요소해석(finite element analysis, FEA)을 통해 von Mises 응력분포(von Mises stress distribution)를 분석하고 weight-bearing 조건에서 안전성 평가를 수행하였다.

## 2. 대상 및 방법

### 2.1 메커니컬 스템의 설계

스템 삽입시 절개를 최소화하기 위해 길이조절이 가능한 스템을 고안하였으며, 곡선형 기어(Curved-gear)로 설계하여 스템의 몸체(Body)에 삽입되도록 하였다. 또한, Spur-gear와 Gear-pin을 조합하여 곡선형 기어가 이동할 수 있게 하였고, 부품들이 완전히 고정될 수 있게 Wedge-pin과 Fixed-pin을 사용하였다. 메커니컬 스템의 구성품은 Fig. 1과 같다.

메커니컬 스템의 구성품 조립은 다음과 같이 진행된다.

1) Curved-gear를 Body에 삽입한 다음 Spur-gear와 Gear-pin을 조립하게 되면 Fig. 2(a)와 같은 메커니컬 스템의 초기상태가 된다.

2) Curved-gear를 환자의 몸에 맞는 크기로 조정된 다음 Wedge-pin으로 고정시키고, Spur-gear의 역회전을 방지하기 위해 Fixed-pin을 고정하여 메커니컬 스템의 최종상태가 된다(Fig. 2(b)).

메커니컬 스템의 기하학적 형상과 크기는 정상인의 67세 남성 고관절 골의 기하학적 구조(bone geometry)를 참고하여 결정하였으며, ca-

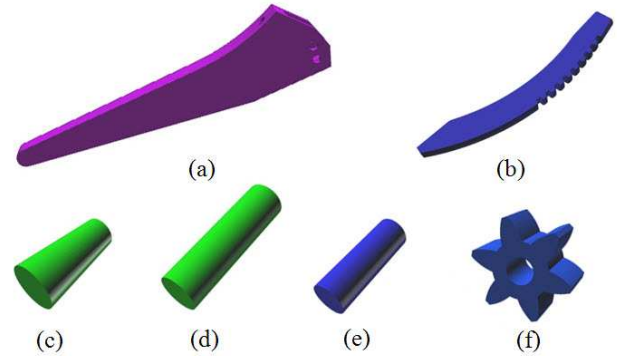


Fig. 1 Mechanical stem for MIS : (a) Body, (b) Curved-gear, (c) Wedge-pin, (d) Fixed-pin, (e) Gear-pin, (f) Spur-gear

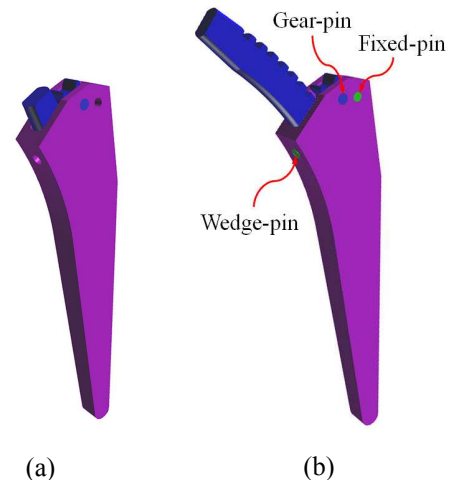


Fig. 2 Assembled mechanical stem : (a) initial state, (b) final state

putcollum-diaphyseal angle(CCD angle)과 femoral anteversion 의 각도는 각각 126.6° 와 13.7° 이다.

### 2.2 모형 제작

개발된 메커니컬 스템의 원활한 작동과 MIS에 대한 적합성을 확인하기 위해 RP 장비를 이용하여 실체크기와 동일한 모형을 제작하였다.

주요 구성품인 Body, Curved-gear 및 Spur-gear의 재료는 아크릴 기반의 폴리머(acryl-based polymer)를 사용하였고, STL 파일을 이용하여 0.1 mm 두께의 얇은 층으로 적층하여 제작하였다. 실물 크기의 Wedge-pin, Fixed-pin 및 Gear-pin은 충분한 강도가 필요하여 SM45C로 제작하였다(Fig. 3).

### 2.3 고관절의 3차원 재구축 및 유한요소모델의 제작

개발된 스템의 구조적 안정성 평가를 위하여,

메커니컬 스템을 삽입하여 THR을 가상 시술하였고, weight-bearing 조건에서 유한요소해석을 수행하였다.

병변이 없는 67세 남성의 고관절을 해부학적 중립위치(anatomically neutral position) 일 때, 1 mm 간격의 횡단면(transverse plane)으로 촬영하여 컴퓨터 단층촬영(computed tomography, CT) 영상 데이터를 얻어 내었다. 얻어진 CT 영상데이터를 기반으로 천골(sacrum), 관골(coxal bone), 대퇴골(femur) 및 관절연골을 각각 3차원 재구축 프로그램인 Mimics(Materialise Inc., Leuven, Belgium)를 이용하여 3차원 재구축(reconstruction)을 하였다. 재구축된 고관절 모델과 고관절 보철물들 사이에 boolean-operation 기법을 이용하여 THR을 가상시술 하였으며, 이때 가상 시술은 정형외과 전문의와 상의하여 수행하였다(Fig. 4(a)).



(a)



(b)



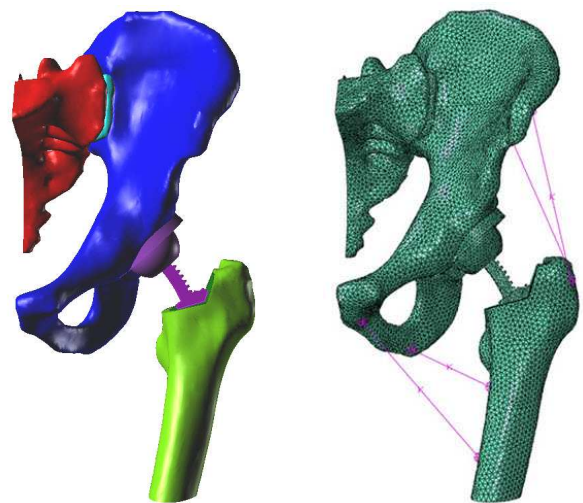
(c)

**Fig. 3** Fabricated actual mechanical stem of acrylic: (a) Parts of stem, (b) initial state, (c) final state

가상 시술된 3차원 기하학적 모델(geometrical model)을 기반으로 고관절 유한요소모델을 제작하였다(Fig. 4(b)). 모든 뼈 구조물들과 인공 보철물들은 정확도 높은 해석을 위하여 10 절점을 가진 사면체 요소(tetrahedral elements)로 유한요소모델링 프로그램인 Patran(MSC software, Santa Ana, CA, USA)을 이용하여 정밀하게 모델링하였다. 재료의 물성치는 Table 1과 같이 적용하였고, 모든 구조물은 균질성

**Table 1** The material properties used for the computations

Materials	Elastic modulus (MPa)	Poisson's ratio	Yield stress (MPa)
Mechanical stem (Ti-6Al-4V)	105 GPa	0.3	970
Head(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	380 GPa	0.245	
Liner(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	380 GPa	0.245	
Cup(Ti-6Al-4V)	105 GPa	0.3	970
Sacrum	17000.0	0.30	
Coxal bone (Cortical/Cancellous)	17000.0/70.0	0.30/0.20	
Femur (Cortical/Cancellous)	15100.0/445.0	0.30/0.22	
Articular cartilages of sacrum and acetabulum	Mooney-Rivlin, C <sub>10</sub> =4.1MPa, C <sub>1</sub> =0.41MPa, D <sub>1</sub> =0		
Gluteii muscles	634 N		
Adductor muscles	344 N		



(a)

(b)

**Fig. 4** 3D reconstruction model : (a) Inserted mechanical model, (b) Mesh model for FEA

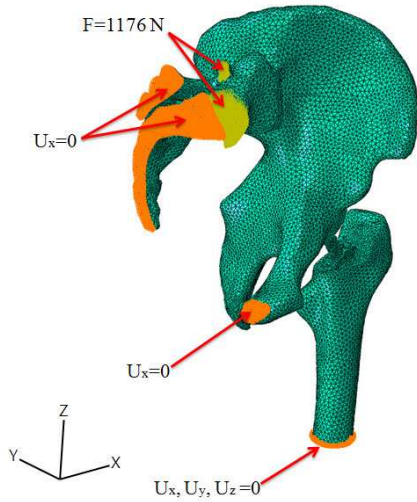


Fig. 5 Applied load and boundary condition

(homogeneous), 등방성(isotropic) 재료로 가정하였다.<sup>(10-12)</sup> Cup과 Stem을 제외한 구조물은 선형탄성(linear elastic) 거동을 보이는 것으로 가정하였고, 생체적합 재료인 Ti 합금(Ti-6Al-4V)으로 가정된 Cup과 Stem은 탄소성 거동을 보이는 것으로 가정하였다.

2.4 유한요소해석

THR 후에 weight-bearing 조건을 고려하였으며, 이때 하중조건은 가혹한 상황에서의 안정성 평가를 위해 실험 대상자의 몸무게보다 더 과중한 120 kg에 해당하는 1176 N 으로 가정하였다. 1176 N의 축하중은 해부학적으로 적절한 위치인 천골의 가장 윗면과 천골뿔사(sacral horn)에 나누어서 적용하였다. 또한, 이때 작용하는 둔근(gluteii muscles)과 외전근(adductor muscles)의 근 수축력(muscle contractile force)을 고려하였다(Fig. 4(b)).<sup>(13)</sup> 대칭조건(symmetric condition)을 적용하여 1/2 좌측 고관절만을 사용하였으며, 천골과 치골능(pubic crest)에  $U_x=0$ , 대퇴골의 밑단은 완전고정 하였다(Fig. 5).<sup>(14)</sup>

모든 구성품 간의 접촉은 면대면(surface to surface) 접촉요소를 사용하였으며, 메커니컬 스템의 구성품 Body, Curved-gear, Wedge-pin, Gear-pin, Fixed-pin, Spur-gear에는 마찰의 영향이 적을 것으로 가정하여 마찰계수 값을 0.1, 스템의 Body와 접촉하는 해면골(cancellous bone)에는 0.4 의 마찰계수를 적용하였다.<sup>(14)</sup> Head와 Liner는 관절 운동이 잘 이루어진다는 것을 고려하여 frictionless를 적용하였다.

Table 2 Maximum von Mises stress each part

Parts	von Mises stress (MPa)	compared with yield stress
Body	484.7	50.0%
Curved-gear	865.6	89.2%
Spur-gear	187.4	19.3%
Wedge-pin	480.2	49.5%
Fixed-pin	81.59	8.4%
Gear-pin	75.96	7.8%

본 연구에서는 범용 유한요소해석 소프트웨어인 ABAQUS(Dassault systems, SIMULIA, RI, USA)를 사용하여 비선형 접촉해석(non-linear contact analysis)을 수행하였다.

3. 결과

메커니컬 스템의 안전성을 평가하기 위해 유한요소해석을 수행하였고, 그 결과를 Ti-6Al-4V 재료의 항복응력(yield stress)과 비교하였다. 전반적인 결과를 보면 대퇴골의 해면골 안쪽면과 접촉되는 메커니컬 스템 Body의 상단 곡선형상 영역에서 압축응력을 주로 받으며 아래로 내려갈수록 적은 응력을 받고 있는 것으로 나타났다. Fig. 6은 유한요소해석의 결과로 얻은 von Mises 응력 분포를 나타낸 것이며 Table 2는 해석 결과를 수치화하여 항복응력과 비교한 것이다.

Fig. 6의 결과와 같이 von Mises 최대응력은 Body에서 484.7 MPa 이 Curved-gear와 접촉되는 구석(corner) 부분에서 발생되었으며, Curved-gear는 865.6 MPa 이 Wedge-pin과 결합되는 모서리(edge) 부분에서 발생되었고, Spur-gear는 187.4 MPa 이 Fixed-pin과 접촉하는 기어의 치형(gear tooth)에서 발생되었으며, Wedge-pin, Fixed-pin, Gear-pin은 각각 480.2 MPa, 81.59 MPa, 75.96 MPa 이 발생되었다. 해석결과 값을 재료의 항복응력 970 MPa 과 von Mises 최대응력과 비교하면 Body는 50.0%, Curved-gear는 89.2%, Spur-gear는 19.3%이며, 나머지 Wedge-pin, Fixed-pin, Gear-pin은 각각 49.5%, 8.4%, 7.8% 수준의 응력이 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 통해 Curved-gear에서 가장 높은 응력 값이 발생하는 것을 알 수 있었다.

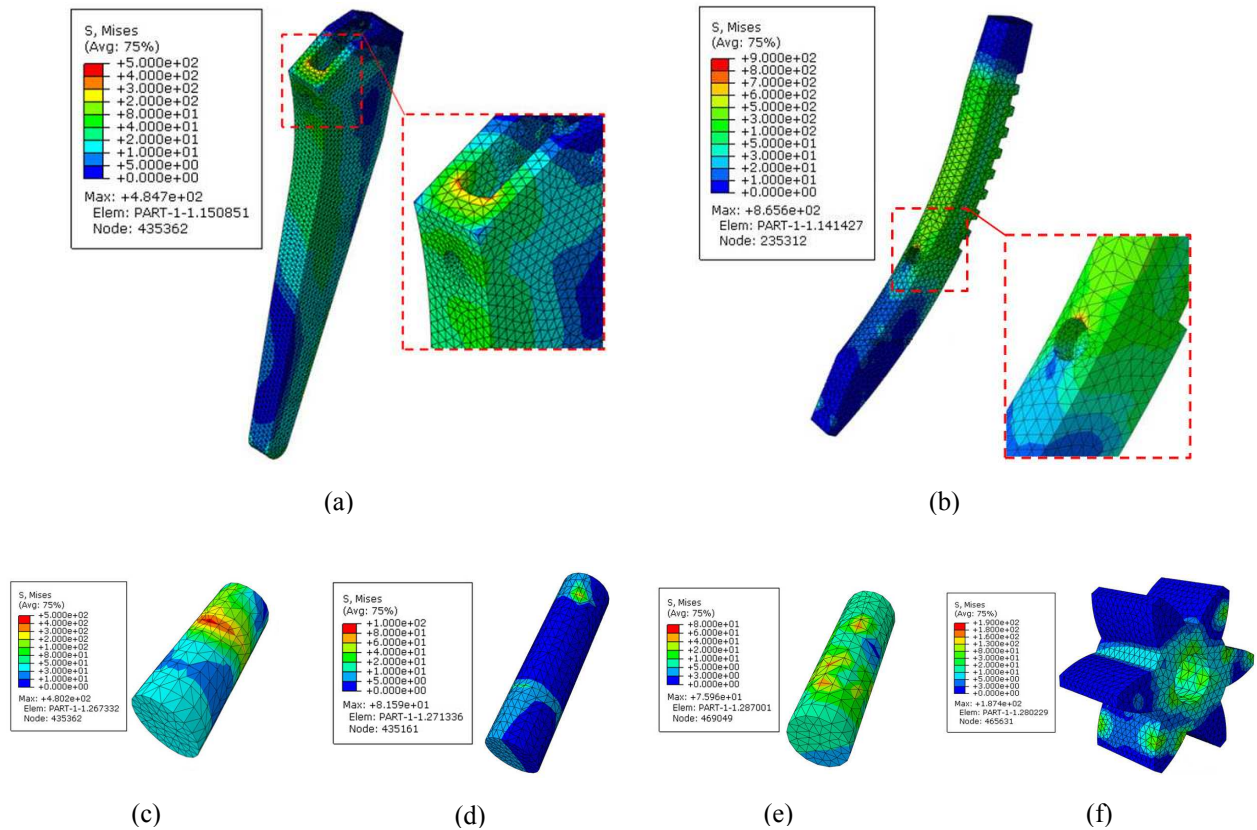


Fig. 6 von Mises stress distribution in : (a) the body, (b) the Curved-gear, (c) the Wedge-pin, (d) the Fixed-pin, (e) the Gear-pin, (f) the Spur-gear

RP 장비를 이용하여 제작된 메커니컬 스템의 모형은 조립에 특별한 문제가 없었으며 전체적인 작동 또한 원활하게 이루어졌으나, 아크릴 기반의 폴리머로 제작된 Spur-gear와 SM45C로 제작된 Gear-pin은 서로 접촉하여 작동할 때, 재질이 서로 달라 접촉하는 면의 마찰계수가 높아 부드러운 작동은 어려웠다(Fig. 3(b), (c)).

#### 4. 결론

오늘날 사용되는 인공고관절 스템은 1959년 J. Charnley 의해 개발된 후 현재까지 다양한 형태로 개발되어 전 세계에 널리 사용되고 있다. 그러나 수술 후 남게 되는 큰 흉터는 여전히 해결해야 할 문제로 남아있다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 메커니컬 스템의 개발과 모형을 제작하였다.

개발된 메커니컬 스템은 기어의 원리를 적용하여 수술 전 후에 스템의 길이를 조절할 수 있는 방식으로 기존의 일체형 방식의 스템보다 약 19% 정도 길이를 줄일 수 있게 되었다.

RP 장비로 제작된 모형의 각 구성품들은 대체로 원활하게 작동하였으나 Spur-gear와 Gear-pin은 서로 다른 재질의 접촉으로 인해 작동이 매끄럽지는 못하였으나 생체적합 재료인 Ti-6Al-4V 합금의 재질로 모든 구성품을 제작 시 원활하게 작동될 것으로 판단된다. 제작된 모형의 작동을 확인한 결과 MIS가 실현가능할 수 있다고 판단하였다. 또한, Fig. 3(c) 와 같이 Curved-gear가 돌출된 만큼 스템의 Body 내부가 빈 공간으로 남아있기 때문에 스템 전체의 무게를 줄일 수 있게 되었고, 기존의 스템과 비교할 경우 약 14% 정도의 무게를 줄일 수 있게 되었다. 따라서 경량형 메커니컬 스템을 제작할 수 있을 것으로 판단된다.

안전성을 평가하기 위한 유한요소해석 결과에서 Curved-gear의 최대응력은 865.6 MPa 이 발생하였고, 그 위치는 Wedge-pin과 결합되는 부분이 었다(Fig. 5(b)). 사용된 Ti-6Al-4V 재료의 항복응력은 일반적으로 알려진 970 MPa 로서 해석된 결과를 비교해 볼 때 충분한 강도를 유지하고 있다고 판단되었다. 또한, 해석에 적용된 하중(1176 N)은

실험 대상자 몸무게의 2배에 해당하는 하중을 좌측 하지에만 고려한 경우이므로 메커니컬 스템에 발생한 최대응력과 항복응력간의 안전계수는 약 4.5가 되는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과에 의해 실제 환자에게 적용하였을 경우 안전성에 문제가 없다고 판단된다.

THR을 받은 환자가 재치환술을 받게 되는 경우, 기존의 일체형 방식의 스템과는 달리 메커니컬 스템은 전부를 교체하지 않고 일부 구성품만 교체할 수 있으므로 수술시간 단축과 수술 과정에 발생할 수 있는 위험성을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 2011년도 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음 (NRF-2011-616-D00004)

## 참고문헌

- (1) Goldstein, W. M., Branson, J. J., Berland, K. A. and Gordon, A. C., 2003, "Minimal-Incision Total Hip Arthroplasty," *J Bone Joint Surg Am*, Vol. 85-A Suppl. 33~38.
- (2) Bertin, K. C. and Rottinger, H., 2004, "Anterolateral Mini-Incision Hip Replacement Surgery: A Modified Watson-Jones Approach," *Clin Orthop Relat Res*, Vol. 429, pp. 248~255.
- (3) Wenz, J. F., Gurkan, I. and Jibodh, S. R., 2002, "Mini-Incision Total Hip Arthroplasty: A Comparative Assessment of Perioperative Outcomes," *Orthopedics*, Vol. 25, No. 10, pp. 1031~1043.
- (4) Waldman, B. J., 2002, "Minimally Invasive Total Hip Replacement and Perioperative Management: Early Experience," *J South Orthop Assoc*, Vol. 11, No. 4, pp. 213~217.
- (5) Yoon, T. R., Bae, B. H., Rowe, S. M., Chung, J. Y. and Lee, K. B., 2003, "Primary Total Hip Arthroplasty with Mini-Incision Technique: Preliminary Report," *J Korean Orthop Assoc*, Vol. 38, pp. 342~348.
- (6) Berger, R. A., 2003, "Total Hip Arthroplasty Using the Minimally Invasive Two-Incision Approach," *Clin Orthop Relat Res*, Vol. 417, pp. 232~241.
- (7) Yoon, T. R., Bae, B. H. and Choi, M. S., 2006, "A Modified Two-Incision Minimally Invasive Total Hip Arthroplasty: Technique and Short-Term Results," *Hip Int*, Vol. 16, Suppl. 4, pp. 28~34.
- (8) Terry, L. D. and John, S. W., U.S. Patent US8048167, Aug. 30, 2005.
- (9) Buly, R., 2005, "The S-ROM Stem: Versatility of Stem/Sleeve Combinations and Head Options," *Orthopaedics*, Vol. 28, pp. s1025~1032.
- (10) Weisse, B., Zahner, M., Weber, W. and Rieger, W., 2003, "Improvement of the Reliability of Ceramic Hip Joint Implants," *J. Biomech*, Vol. 36, No. 11, pp. 1633~1639.
- (11) Mak, M. M., Besong, A. A., Jin, Z. M. and Fisher, J., 2002, "Effect of Microseparation on Contact Mechanics in Ceramic-on-Ceramic Hip Joint Replacements," *Proc Inst Mech Eng Part H: J Eng Med*, Vol. 216, No. 6, pp. 403~408.
- (12) Phillips, A. T. M., Pankaj, P., Howie, C. R., Usmani, A. S. and Simpson, A. H. R. W., 2007, "Finite Element Modelling of the Pelvis: Inclusion of Muscular and Ligamentous Boundary Conditions," *Medical Engineering & Physics*, Vol. 29, pp. 739~748.
- (13) Phillips, A. T., Pankaj, P., Howie, C. R., Usmani, A. S. and Simpson, A. H., 2007, "Finite Element Modelling of the Pelvis: Inclusion of Muscular and Ligamentous Boundary Conditions," *Med Eng Phys*, Vol. 29, pp. 739~748.
- (14) Bae, J. Y., Farooque, U., Lee, K. W., Kim, G. H., Jeon, I. S. and Yoon, T. R., 2011, "Development of Hip Joint Prostheses with Modular Stems," *Computer-Aided Design*, Vol. 43, No. 1, pp. 1173~1180.