

# 3차원 형상정보에 따른 생체모방형 무릎관절 구동의 변화

(The variation of biomimetic knee joint movement  
according to 3D shape information)

정 훈 진<sup>1)</sup>, 이 승 재<sup>2)\*</sup>

(Hoon-Jin Jeong and Seung-Jae Lee)

**요 약** 본 논문에서는 인체의 CT/MRI에서 단층 촬영된 무릎관절을 영상처리 과정을 거쳐 3차원 관절 모델을 제작하였다. 실제 무릎관절의 형상을 추출할 때 설정 조건에 따라 3차원 형상정보가 달라질 수 있다. 이러한 미세한 3차원 형상정보의 차이에 따른 무릎관절의 구동특성을 분석하기 위해 2가지의 관절 모델을 3차원 프린터를 이용하여 제작하였다. 제작된 관절모델을 이용하여 관절구동 시 압축력 실험을 수행하였고 형상의 차이에 따라 결과값의 차이가 발생하였다. 따라서 생체모방형 바이오리액터를 개발할 경우에는 형상정보의 차이에 대한 연구가 선행되어야 할 것으로 사료된다.

**핵심주제어** : 생체모방형, 3차원 형상정보, 무릎 관절, 3차원 프린팅

**Abstract** We fabricated a 3D knee joint model through the imaging processing. The 3D shape information is different depends on specific conditions when the shape of real knee joint is extracted from CT/MRI sliced images. The two types of joint models were fabricated by using 3D printer in order to analysis of joint movement by slight difference of 3D shape information. The compressive force experiments were performed by using knee joint model. As the results, the compressive forces were changed with respect to the difference of geometry. Consequently, feasibility test should be performed before developing biomimetic bioreactor.

**Key Words** : Biomimetic, 3D shape information, Knee joint, 3D printing

## 1. 서 론

최근 들어, 조직공학(tissue engineering)에서는

손상된 장기 및 골 조직을 재생하기 위한 연구가 활발히 진행되어져 오고 있다<sup>[1~4]</sup>. 특히 무릎 관절의 경우는 광범위한 굴신 운동으로 인한 큰 관절하중으로 다양한 손상 및 질환이 발생하는 신체조직 중 하나이다. 이러한 무릎 관절에 질환이 발생한 경우 치료와 재활이 중요한 문제가 되고 있기 때문에 다양한 치료방법이 연구되고 있다<sup>[5~8]</sup>.

\* Corresponding Author : sjlee411@wku.ac.kr

+이 논문은 한국연구재단 일반연구자 지원사업과 전라북도 R&D 지원사업의 지원(20140312-A-001) 과제 지원에 의해 연구되었음.

Manuscript received June 10, 2015 / revised June 26, 2015 / accepted June 29, 2015

1) 원광대학교 기계공학과, 제1저자

2) 원광대학교 기계자동차공학부, 교신저자

조직공학에서는 환자의 손상된 조직의 재생을

위해 실제 관절형상을 모사한 생체모방형 바이올리액터를 개발하여 맞춤형 조직을 재생하고자 하는 연구가 진행중이다. 본 연구팀에서는 실제 인체의 관절 형상을 이용하여 관절모델을 제작하고 무릎의 운동을 재현하고자 관절구동시스템을 개발하였다. 그러나 인대 및 주변근육 역할을 해줄 수 있는 부분은 아직 완벽하게 개발되지 않은 상황이므로 무릎의 운동이 실제와는 차이가 발생한다.

생체모방형 무릎 관절 모델을 제작하기 위해서는 우선 CT/MRI 영상의 윤곽선을 추출하는 영상처리 과정을 거쳐야 한다. 이를 통해 2차원 영상으로부터 3차원 모델을 생성하고 3D 프린팅 기술을 이용하여 실제 모델을 제작할 수 있다. 그러나 영상처리 과정에서 뼈의 윤곽을 제외하고 불필요한 부분의 윤곽은 제거하거나 수정해야 한다. 이때 오차 및 왜곡이 발생할 수 있는데 이러한 3차원 형상 정보의 차이에 따라 무릎관절 구동의 특성이 달라질 수 가 있다.

따라서, 본 연구에서는 무릎관절의 형상을 실제 관절 형상과 유사하게 모사한 3차원 모델과 그렇지 않은 3차원 모델을 제작하여 관절 구동의 특성을 비교해보고자 한다. 이러한 연구는 생체모방형 관절구동 바이올리액터의 개발의 기초 자료로도 활용될 수 있을 것이다.

## 2. 3D 무릎 관절 모델 제작

### 2.1 CT/MRI data 추출

관절 형상을 추출하기 위하여 성인 남성 관절(나이: 28세, 키: 170cm)의 CT/MRI data를 이용하였다. 관절형상을 추출하는 방법으로는 Fig. 1에서 보는바와 같이 단층 촬영된 파일을 Mimics program으로 불러온 뒤 추출하고자 하는 관절 및 연골을 Fig. 2처럼 각각의 층마다 색칠하여 추출하였다. 이렇게 추출된 관절형상은 한 층씩 색칠한 뒤 결합하는 형태로 제작되기 때문에 표면에 거칠기가 존재한다. 따라서 표면을 최대한 매끄럽게 해주기 위하여 추출된 관절형상을 Rapidform XOR2 프로그램으로 불러와 표면을 매끄럽게 가공해 주었다.

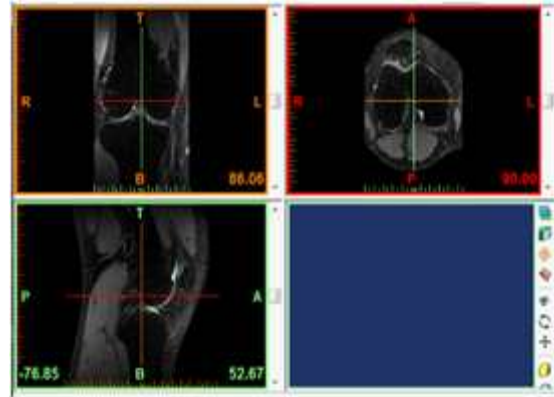


Fig. 1 CT/MRI images of knee joint

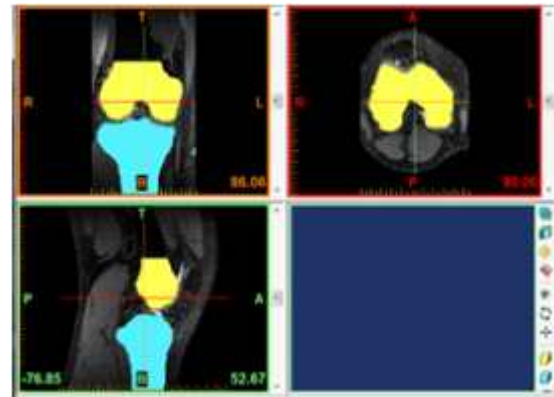


Fig. 2 Extracted knee joint model using Mimics software

### 2.2 관절 제작

프로그램을 통하여 추출된 관절 형상을 자체적으로 개발된 바이올리액터의 링크와 연결 시켜주기 위하여 3D 설계 프로그램으로 재 디자인 하였다. Fig. 3에서 보이는 바와 같은 관절형상의 설계는 CATIA를 이용하였다. 3차원 관절 모델은 실제 관절의 형상을 주요 특징을 일부 모사한 bio-inspired model과 실제 관절의 단층 촬영한 데이터에서 추출해온 이미지를 바탕으로 좀 더 실제와 유사한 bio-mimetic model을 생성하였다. 이러한 3차원 모델은 STL파일로 변환한 후 3D 프린터(UP2, PP3DP)를 이용하여 제작하였다(Fig. 4). 사용된 재료는 ABS이고 대퇴부의 lateral과 medial의 인체학적 위상차 ( $\Theta = 3^\circ$ )를 고려하여 설계하였다(Fig. 3). 또한 내회전 및 외회전이

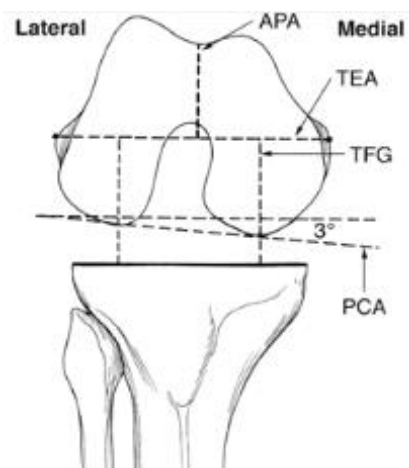


Fig. 3 Anatomical characteristic of knee joint model



(a) Bio-inspired knee joint model



(b) Bio-mimetic knee joint model  
Fig. 4 Fabricated knee joint model

구속된 상태에서 관절의 각 부분별 압력을 측정하기 위해 lateral 과 medial 사이의 patella groove를 tibia로 채워주었다. Tibia 모델은 실제 반월상연골이 femur를 감싸고 있는 형상을 고려하여 femur의 굴곡면과 유사하게 제작하였다(Fig. 4(a)).

### 3. 압축력 측정

#### 3.1 측정 방법

압축력 측정은 크게 3가지 Zone으로 나뉘어 진행하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 간헐적으로 자극을 받는 Zone1, 계속적으로 자극을 받는 Zone 2, 굴신운동을 시작함과 동시에 압축을 받지 않는 Zone 3으로 나누어서 압축력을 측정하였다. 압력측정은 Force Sensing Resistor (SEN-09673, Mechasilusion) sensor를 이용하여 측정하였다. 본 연구에서는 압축력 실험 시 굽힘 각을 0~30° 즉, 180°~150°로 측정하였다. 굴신속도는 10mm/sec로 하였고 자중은 1kg으로 하였다. 측정 방법으로는 각 위치에 센서를 부착 후 aduino 프로그램을 통하여 10mm/sec 주기로 데이터를 출력하여 하중값을 구하였다.

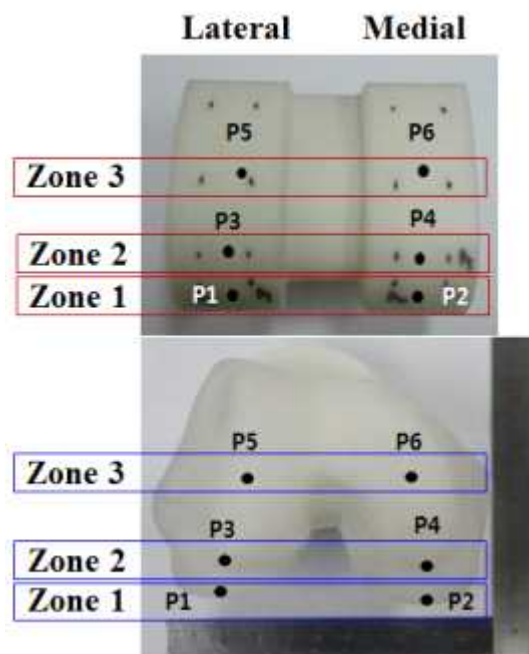


Fig. 5 Measurement position of compression points

#### 3.2 측정 결과

Bio-inspired knee joint 모델의 압축력 측정 결과 Zone 1 에서는 lateral 부분인 P1, medial 부분인 P2가 비슷한 선형을 보였다(Fig. 6). 관절 굴곡면의 형상과 가해지는 수직하중으로 인하여 160~170° 구간에서 슬라이딩이 일어나는 것을 볼 수 있었고 최대각인 147°에서 P1, P2 가 tibia

The variation of biomimetic knee joint movement according to 3D shape information

에 접촉해 있는 것을 볼 수 있었다. 이에 따라서 무릎이 최대각으로 굽혀졌다 올라오는 구간인 147°~160°에서 가장 큰 압력이 측정되는 것을 볼 수 있었다.

Zone 2 역시 P3과 P4가 비슷한 선형을 보였으며 P3에서는 147°~170° 구간에서 압축력을 받지 않는 것을 볼 수 있었다(Fig. 7).

Zone 3 은 180°에서 무릎이 굴신운동을 시작하는 순간부터 다시 180°되기 전까지 압축하중을 전혀 받지 않는다. 따라서 무릎에 다 펴져 있을 때인 180°에서 최대 수직압축력을 받는 것으로 측정되었다(Fig. 8).

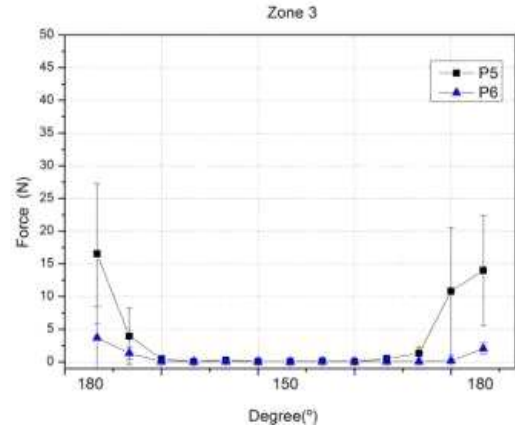


Fig. 8 Pressure measurement of Zone3

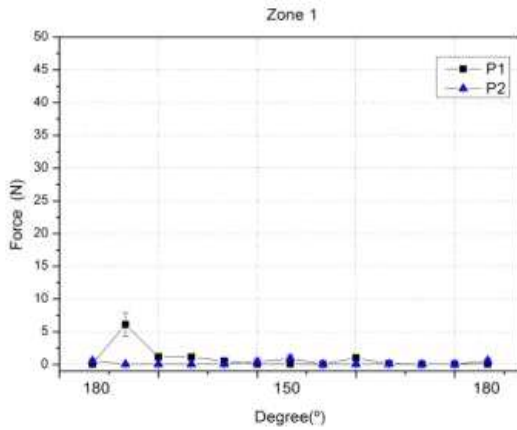


Fig. 6 Pressure measurement of Zone1

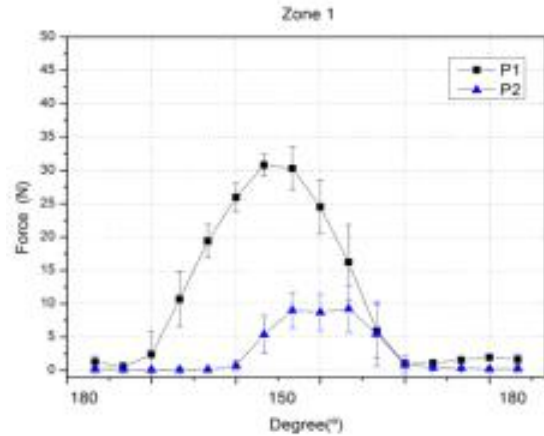


Fig. 9 Pressure measurement of Zone1

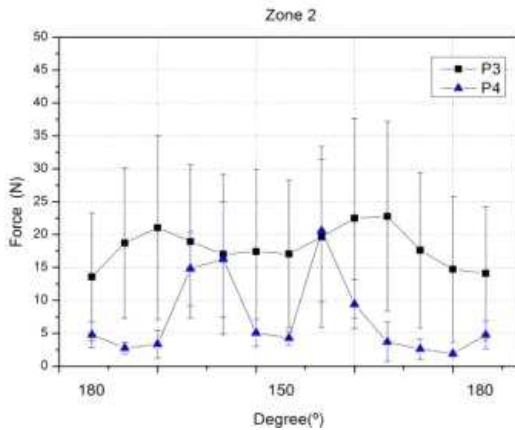


Fig. 7 Pressure measurement of Zone2

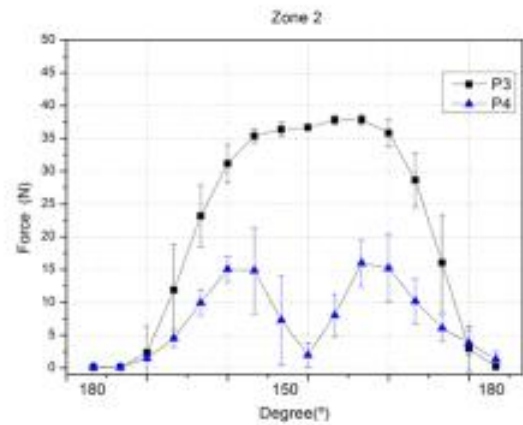


Fig. 10 Pressure measurement of Zone2

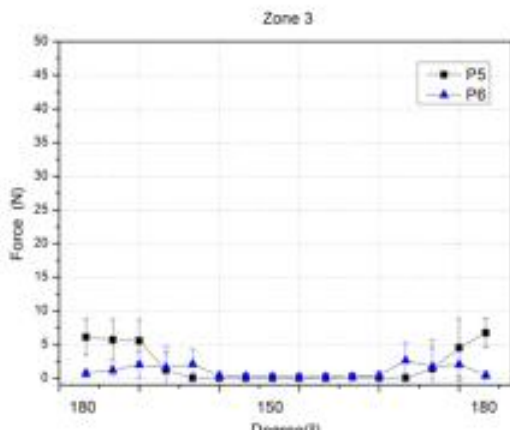


Fig. 11 Pressure measurement of Zone3

Bio-mimetic knee joint 모델의 압축력 측정결과 Zone 1에서는 Fig. 9에서 보는바와 같이 P1에서 받는 압축력이 P2보다 전반적으로 높았다.

즉, lateral 부분이 medial 부분보다 압축을 많이 받는 것을 알 수 있었다. 압축을 받는 범위로는 lateral 부분이 더 많은 각도에서 받는 것을 볼 수 있었다.

Zone 2에서는 예상했던 것과 달리 Zone 1보다 더 넓은 범위에서 압축을 받는 것을 확인할 수 있었다. 이 영역에서도 lateral부분이 전반적으로 더 많은 하중을 받는 것을 볼 수 있었다. medial 부분에서는 Zone 1과는 달리 관절이 굽혀져 피지는 부분인 30°부근에서 stress를 거의 받지 않는 것을 볼 수 있었다(Fig. 10).

Zone 3에서는 예상과 같이 굴신과 동시에 거의 압축력을 받지 않는 것을 관찰할 수 있었다(Fig. 11). 선행 연구에서와 동일한 위치에서의 압축력 실험을 하였지만 Zone 1과 Zone 2가 뒤바뀐 압력분포를 보이는 것은 관절형상의 차이에서 비롯되었다고 해석되어진다. Zone 2에서 무릎이 굽혀지는 부근에서의 압축력이 감소하는 현상도 역시 femur와 tibia의 각기 다른 표면 형상때문인 것으로 판단된다.

Shantanu Patil 등은 실제 사람의 뼈를 가지고 압축력 실험을 한 결과 같은 하중에서 lateral에서의 압축하중이 medial보다 많이 받는 것으로 측정되었다[10]. 본 실험에서도 같은 하중에서 lateral과 medial의 압축하중을 비교해 본 결과

Zone 1에서는 그 차이가 크지 않았으나 Zone 2에서는 lateral point 값들이 더 많은 압축력을 받는 것으로 측정되었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 무릎관절의 형상을 실제 관절형상과 유사하게 모사한 3차원 모델(bio-mimetic knee joint model)과 그렇지 않은 3차원 모델(bio-inspired knee joint model)을 제작하여 관절구동의 특성을 비교해보았다. 이를 위해 CPM장치를 기반으로 굴신 운동이 가능하고 관절에 압축하중을 가할 수 있는 생체모방형 관절구동장치를 제작하였다. 2가지 종류의 관절 모델은 실제 인체의 관절 CT/MRI data를 Mimics 프로그램을 통하여 영상처리 과정을 거쳐 원하는 형상으로 추출한 뒤 3D printer를 이용하여 제작하였다. femur 표면을 크게 세 부분으로 나누어 각 영역에서의 180°~150° 굴신 시 받는 압축력을 측정하였다.

결과적으로 Zone 1과 Zone 2에서는 간헐적, 계속적으로 stress를 받는 것을 관찰할 수 있었고 Zone 3는 굴신과 동시에 압축력을 받지 않는 것을 확인할 수 있었다. 또한 두 가지 모델 모두 lateral 부분이 medial 부분보다 압축력이 높게 측정되었으나 상대적으로 bio-inspired knee joint model에서는 그 차이가 명확하지 않았다. 이는 형상에 따른 무릎관절 구동이 영향을 받는 것을 의미하고 보다 실제 관절 형상과 유사한 모델이 기존의 인체의 cadavar 실험 결과와 유사성을 보이고 있다.

즉 무릎 관절의 실제 구동 현상은 관절의 3차원 형상 정보의 정확도가 영향을 줄 수 있으며, 그 외 에도 반월상 연골 전·후방 십자인대, 좌·우측 인대 및 근육에 따라 차이가 발생할 수 있다. 따라서, 관절연골 재생을 위한 생체모방형 관절 구동 바이오리액터의 개발을 위해서는 CT/MRI data의 영상처리에 대한 연구와 다양한 외부 환경에 대한 조건이 확립되어야 가능할 것으로 사료된다.



## 후 기

본 논문은 한국연구재단 일반연구자 지원사업과 전라북도 R&D 지원사업의 지원(20140312-A-001)에 의해 수행되었습니다.

## References

- [1] Vunjak-Novakovic, G. Meinel, L. Altman, G. and Kaplan, "bioreactor Cultivation of Osteochondral Grafts", Orthodontics and Craniofacial Research, Vol. 8 No. 3, pp. 209-218, 2005.
- [2] Z. xizheng, W. Han, H. Daqing, and G. jing, "Direct compression as an appropriately mechanical environment in bone tissue reconstruction in vitro", Medical Hypothesis, Vol. 67, pp. 1414-1418, 2006.
- [3] Z. Y. hang, S. H Teoh, W. S Chong, T. T Foo, Y. C Chng, "A biaxial rotating bioreactor for the culture of fetal mesenchymal stem cells", Biomaterials Vol. 30, pp. 2694-704, 2009.
- [4] Peter Reher, El-Noor, "The Stimulation of bone formation in vitro by the rapetic ultrasound", Vol. 23 No. 8, pp. 1251-1258, 1997.
- [5] M. Bhattacharjee, J. Coburn, M. Centola, S. Murab. A. Barbero, David L. Kaplan, I. Martin, S. Ghosh, "Tissue engineering strategies to study cartilage development, degeneration and regeneration", Drug Deliv. Rev, Vol 16, pp. 1-16, 2014.
- [6] E.B. Hunziker, K. Lippuner, M.J.B. Keel, N. Shintani, "An educational review of cartilage repair: precepts & practice myths, & misconceptions progress & prospects", Osteoarthritis and Cartilage, Review, pp. 1-17, 2015.
- [7] Johnna S. Temeno, Antonios G. Mikos,

"tissue engineering for regeneration of articular cartilage", Biomaterials, Vol 21, pp. 431-440, 2000.

- [8] C. Madeira, A. Santhagunam, Joa.o B. Salgueiro, and Joaquim M.S. Cabral, "Advanced cell therapies for articular cartilage regeneration", Vol 33, No 1, pp. 35-42, 2015.
- [9] Shantanu Patil, "Comparative biomechanical analysis of human and caprine knee articular cartilage", The Knee Vol. 21, pp. 119-125, 2014.



정 훈 진 (Hoon-Jin Jeong)

- 정회원
- 원광대학교 기계공학과 공학사
- 원광대학교 기계공학과 공학석사 재학중
- 관심분야 : 의료영상데이터, 생체모방공학, 조직공학



이 승 재 (Seung-Jae Lee)

- 정회원
- 국민대학교 기계공학과 공학사
- 포항공과대학교 기계공학과 공학석사
- 포항공과대학교 기계공학과 공학박사
- 원광대학교 공과대학 기계자동차공학부 조교수
- 관심분야 : 의료영상데이터, 생체모방공학, 조직공학