

의학 쾌속조형 (MRP, Medical Rapid Prototyping) 기술

발체인 _ 김민생, 추원식, 김형중, 안성훈 _ 서울대학교 기계항공공학부 _ ahnsh@snu.ac.kr

쾌속조형(RP, rapid prototyping)은 상당히 복잡한 3차원(3D, Three-dimensional) CAD 모델로부터의 시작품을 제작하는데 사용될 수 있기 때문에, 공학 및 산업분야에서 뿐만 아니라 다른 분야에서도 많이 응용되고 있다. 스테레오 리소그래피(SLA 또는 SL, Stereolithography), 레이저소결법(SLS, Selective Laser Sintering), FDM (Fused Deposition Modeling), LOM (Laminated Object Manufacturing), 3D 프린팅(3DP) 등의 RP 장치를 통해서 종이에서부터, 플라스틱, 금속, 바이오 재료에 이르기까지 다양한 재료를 활용할 수 있다. 이번 호에서는 RP 기술을 이용해서 인체의 3차원 모델을 제작하는 의학 쾌속조형(MRP, Medical Rapid Prototyping)에 관하여 ‘NewScientistTech’와 ‘BizOrigin The Art & Science of Startups’에 소개된 최근 기사와 저널에 발표된 연구내용을 기반으로 정리하였다.

1. RP의 의학용 모델 제작

의학 분야에서 RP의 이용은 공학적인 측면뿐만 아니라 의학적인 측면에서의 접근도 필요로 하는 복잡한 작업이다. 현재 MRP는 이비인후과, 신경외과, 정형외과 및 치과 등의 의학 분야에서, 인체의 골격과 같은 단단한 조직(hard tissue)에서부터 혈관과 같은 무른 조직(soft tissue)에 이르기까지 활발하게 연구가 진행되고 있다. 이러한 MRP 기술 연구는 쾌속조형 기술의 발전과 인간 내부 모델에서 고품질의 의학 이미지를 추출하고 처리할 수 있는 관련 기술의 발전으로 더욱 활용도가 증대되고 있으며, 일반적인 3D 모델 제작과정은 Figure 1과 같은 과정을 거쳐서 이루어진다.

1.1. 3D 디지털 이미지(3D digital image)

3D 디지털 이미지는 컴퓨터 단층촬영(CT, Computed Tomography) 장치 또는 자기공명영상(MRI, Magnet-

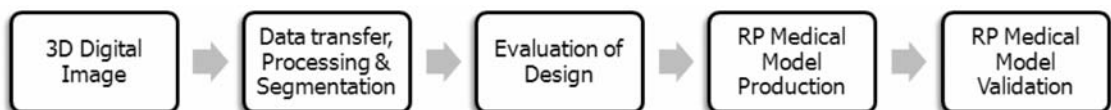


Figure 1. RP 기술을 이용한 의학용 3D 모델 생성 과정

ic Resonance Imaging) 장치와 같은 컴퓨터 X선 단층 촬영으로 얻을 수 있다. 이미지 기술은 인체 내부의 구조 모델링에 활용되어지는데, 대부분의 CT와 MRI 장비들은 공통적인 의학 파일 포맷인 DICOM (Digital Imaging and COmmunication in Medicine)을 사용하여 3D 디지털 이미지를 추출할 수 있다. 그리고, 보다 정확한 3D 모델의 생성하기 위해서 대략 0.5~1.0 mm 정도의 두께로 대상물을 슬라이스하여 이미지를 추출하여야 한다.

1.2. 자료 전송, 처리 및 분할(Data transfer, processing and segmentation)

MRP를 적용하고자 하는 인체 부위의 CT와 MRI 이미지 자료를 추출한 후, RP 작업을 위한 처리과정은 가장 복잡하면서도 사실상 최종 의학용 모델의 품질을 결정하는 중요한 단계이다. 이 단계에서 RP를 담당하는 엔지니어는 Figure 2에서와 같이 'Mimics'나 '3D Doctor'와 같은 소프트웨어 프로그램을 이용하여 인체 내부 모델을 세부적으로 복원하는 작업을 진행한다. 그리고, 정교한 3D 표현을 위해서 다양한 색깔을 입히고, 가상의 3D의 모델을 완성시킨 이후에 DICOM 이미지 자료를 RP 파일로 전환시킨다.

1.3. 디자인 평가(Evaluation of design)

디자인 평가는 제작되는 모델의 형상, 재료, 품질 요구도 등에 따라서 방법이 결정된다. 외과용 보강재, 인공뼈 등을 제작하기 위해서는 CAD 프로그램인 CATIA 등을 이용하여 IGES나 STL 포맷의 임시 모델들을 만드는데, 이러한 과정에서 설계된 모델링 자료의 정확도와 품질 등을 평가하기 위한 과정을 거친다. 또한, 엔지니어의 실수와 장비 및 소프트웨어 상의 문제점에 의한 가상모델의 오류가 발생되었을 수도 있기 때문에 관련 전문의의 평가도 요구된다.

1.4. 쾌속조형 의학 모델 제작 (RP medical model production)

RP 장비를 이용한 모델 제작 단계에서는 모델에서 요구되는 정밀도, 표면처리, 내부 구조물에 대한 시각적인 표현, 색깔, 선택된 재료 및 요구되는 강도 등과 더불어 모델의 사용 목적에 따라서 적절한 RP 기술과 장비를 적용해야 한다. 이 단계에서 장비에 입력되는 3D 가상 모델은 STL 포맷에서 모델 제작을 위한 RP 상용 소프트웨어로 전환하여 입력한다.

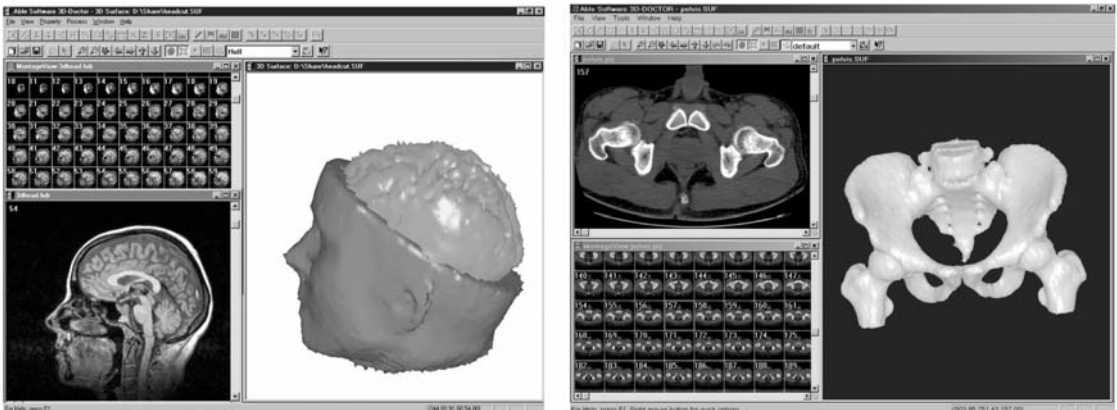


Figure 2. MRP를 위한 상용 소프트웨어 프로그램(3D Doctor) 활용 예

1.5. 래속조형 의학 모델 확인(RP medical model validation)

최종 단계에서 RP 의학 모델이 제작되며, 이 모델에 대해서 인체 적용을 위한 적합여부를 관련 전문가에게 재확인 받아야 한다.

2. 래속 조형기술의 의학분야 적용

2.1. 의학용 기구/도구의 설계와 개발

의학용 기구의 설계와 개발 분야는 MRP 적용에 있어서 가장 활발한 성과를 보이고 있는 분야이며, 그 대상은 외과적인 보조기구에서부터 보청기에 이르기까지 폭넓게 활용되고 있다. 대표적인 사례로 ‘Objet Geometries’社は 폴리젯(Polyjet) 기술을 기반으로 3D 프린터를 자체 개발하였으며, 유연성, 색깔 등의 특성이 다른 3종류의 젤 형태(gel-like) 레진을 이용하여 Figure 3과 같은 보청기 틀(hearing aid mold)을 제작하였다.

2.2. 외과 수술 및 교육

RP 기술은 수술과 같은 외과치료에 있어서도 다양하게 적용될 수 있다. 예를 들어서 외과 전문가들은 3D 인체 모델을 통해서 복잡하고, 심각한 외과 수술을 계획하고 사전에 실험할 수 있다. 수술을 앞둔 전

문의들이 이러한 과정을 반복적으로 시행하고, 자기 훈련을 수행한다면, 실제 환자를 대하는 수술실에서 수술의 정확도를 높일 수 있고, 이를 통해서 수술 위험을 최소화하고 수술 시간도 절약할 수 있을 것이다. 또한, RP를 이용한 3D 모델의 제작과정에서 세부 인체 구조물에 대해서 다양한 색깔을 입힐 수도 있는데, 이렇게 제작된 모델은 일선의 전문의 뿐만 아니라, 강의실에서 관련 의학 교육을 받는 학생들의 빠른 이해를 도모하는데 큰 도움을 줄 수 있을 것이다.

Figure 4는 영국 UCL (University College London) 병원에서 트레처콜린스 증후군(TCS, Treacher Collins Syndrome) 환자의 손상된 눈 주위 광대뼈를 티타늄 임플란트로 보강한 수술을 보여주고 있다. 선천적으로 광대뼈가 덜 형성된 TCS 환자의 골이식을 위해서, 먼저 CT 촬영을 통해서 환자의 전체 두개골에 대한 이미지를 얻고 STL 포맷으로 전환하여 ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)로 RP 모델을 제작하는 과정을 거쳤다. 그리고, 이를 기반으로 골이식 부위에 대한 티타늄 임플란트를 제작하였다.

2.3. 생체적합 및 생체활성 임플란트 (biocompatible & bioactive implant) 설계와 제작

임플란트 재료는 이식된 이후 생체 반응을 거슬리지 않는 생체적합(biocompatible) 특성과 재료 내부로



(a) Clear 레진

(b) RoseClear 레진

(c) Skin tone 레진

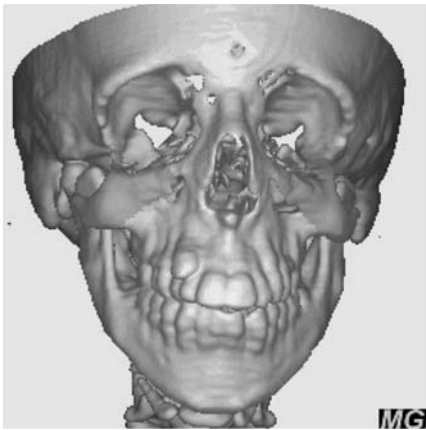
Figure 3. Objet Geometries 社の 보청기 틀



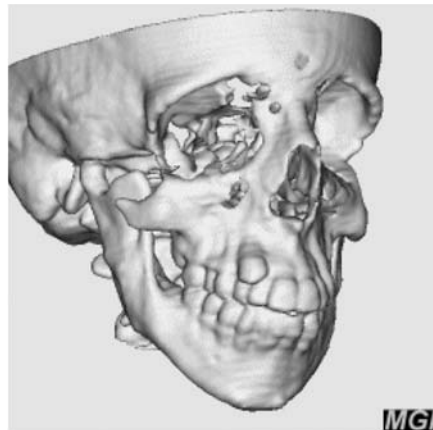
생체조직이 융합될 수 있는 생체활성(bioactive) 특성을 지니고 있어야 한다. RP 기술은 이러한 생체적합 및 생체활성 재료를 이용한 생체 조직공학(tissue engineering)에도 중요한 기여를 하고 있다. 조직공학은 조직을 만드는 세포와 세포를 지지하여 성장시키는 생체재료인 스캐폴드의 결합으로 볼 수 있다. 그리고 FDM, 3DP, SLS 등과 같은 RP 시스템이 조직공학에서 요구되는 다공성 구조의 설계와 제작에서 편리하게 사용되어지고 있다.

3. 최근 경향 및 미래 전망

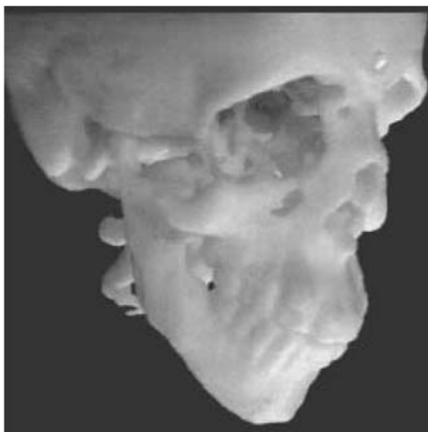
최근의 연구는 RP 공정의 발전에 따라서 폴리머나 티타늄과 같은 금속재료를 이용하여 인공뼈 임플란트를 제작하는 노력들이 진행되고 있다. 인공뼈는 새로운 뼈를 지탱할 만큼 충분히 강하면서, 인체조직에 의해서 흡수되어지거나 대체되어 질 수 있을 만큼 충분한 다공성의 구조를 가져야 한다. 인공뼈 임플란트 기술은 심각하게 손상된 뼈를 대체하기 위한 것이며, 또한 다른 복잡한 장기를 만들기 위한 아주 중요한 첫



(a) TCS 환자의 CT 촬영 이미지



(b) RP 제작을 위한 SLP 포맷 이미지



(c) RP 제작 모델 (ABS)



(d) 티타늄 임플란트 보강 모습

Figure 4. TCS 환자의 광대뼈 골이식 수술 적용 예

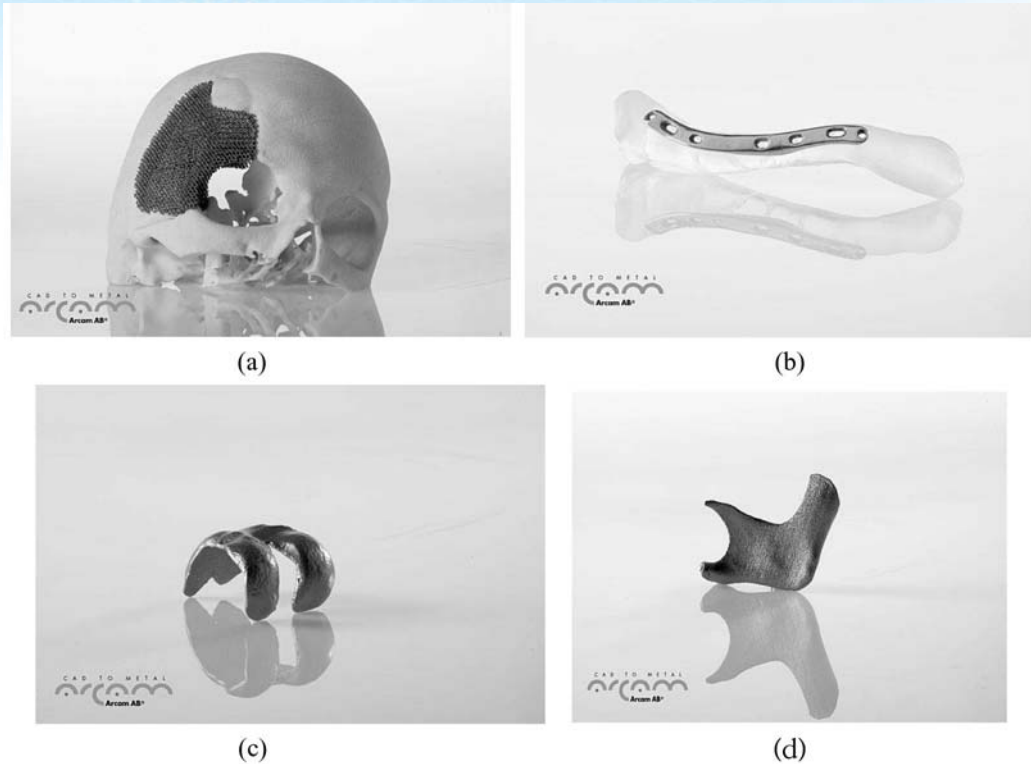


Figure 5. 금속 MRP 분야 적용 예, 'Arcum AB'社 (a) 측면 두개골, (b) 인체 뼈, (c) 개의 무릎뼈, (d) 턱 조각

단계이기도 하다. 최근 활발하게 연구가 진행되고 분야 중에서 금속을 이용한 RP 기술과 잉크젯 프린터를 이용하여 인공 장치와 인공뼈를 제작하는 과정을 살펴보기로 하자.

3.1. 금속을 이용한 MRP 적용

금속재료 중에서 비강도가 우수하고, 인체에 적합한 티타늄 합금(Ti6Al4V)이나 코발트-크롬 합금 등을 이용한 MRP 분야 역시 많이 연구가 이루어지고 있다. 주로 뼈의 심각한 골절, 암이나 사고에 의해 뼈의 일부가 소실된 경우 이 방법을 적용할 수 있을 것이다. 이러한 인공뼈는 금속 파우더를 층마다 레이저를 이용하여 소결하는 방법으로 적층하여 제작된다. Figure

5는 대표적인 금속 RP 장비 제작 업체인 'Arcum AB'社에 의해서 개발된 프린터를 이용한 의학용 임플란트의 시작품들을 보여주고 있다.

3.2. 잉크젯 프린팅 기술을 이용한 3D 조직 제작

일본 토야마 대학의 Makoto Nakamura 교수는 잉크젯 프린터에서 분사되는 잉크방울의 크기가 인체의 세포 크기와 유사한 10 μm 정도인 것을 착안하여, 잉크젯 프린팅 기술을 인체의 장기 이식수술에 적용하기 위한 연구를 시작하였다. Nakamura 교수는 3D 공간에서 배열되어 있는 세포와 다양한 생체 재료를 이용하여 인간의 장기를 생산하기 위한 연구를 진행하고 있다. 이를 위해 잉크젯 기술을 기

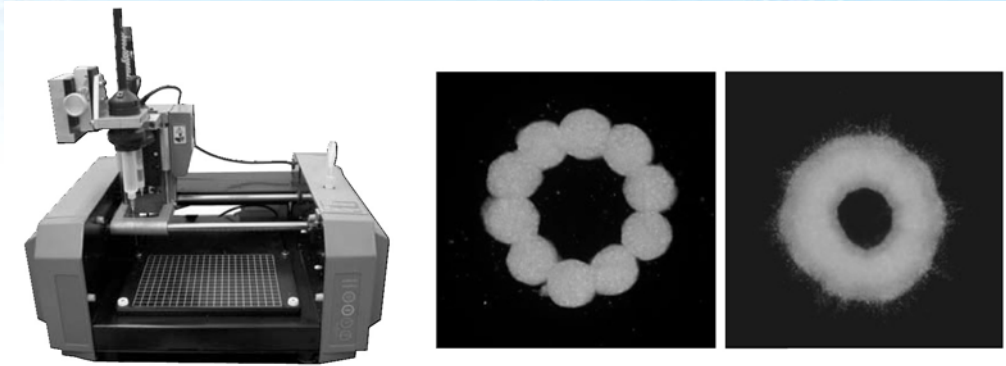


Figure 6. (a) 바이오 잉크젯 프린터: Organovo, (b) 좌측: 바이오 시트에 분사된 바이오 잉크, 우측: 3일 경과

반으로 3D 바이오 프린터를 자체 제작하였다. 그리고, 살아 있는 세포들을 잉크방울처럼 분사하는 실험을 통해 혈관형태와 유사한 1 mm 지름의 튜브와 다양한 시트 형태의 3D 하이드로젤 구조를 제작하였다.

3.3. 잉크젯 프린팅을 이용한 심장 세포 연구

미국 미주리 컬럼비아 대학의 생체물리 과학자인 Gabor Forgacs 교수와 그의 연구팀은 자체 제작한 3D 잉크젯 프린터인 'Organovo'를 이용하여 3D 생체 조직을 완벽하게 프린팅하는데 성공하였다(Figure 6). 그들 연구팀은 닭의 살아있는 심장세포를 일부 떼어내어서, 마이크로 피펫을 통해서 '바이오-잉크' 세포가 분사되며 프린팅을 수행한다. 인간을 포함한 동물의 심장은 박동 조절 세포의 동조(synchronizing) 현상이 무엇보다 중요하지만, 처음 닭의 심장 세포가 프린팅 되었을 때는 박동이 일치하지 않았다. 하지만, Forgacs 교수 연구팀은 프린팅이 완료되고 19시간 정도가 지난 이후 세포들이 정렬이 되고, 조직 구조들이 융화되고 잠시 후 동조하여 박동이 시작된 것을 확인하였다. 연구팀이 개발하고 연구하고 있는 'Organovo'와 같은 바이오 프린팅 기술은 요구되는 형상의 스캐폴드만 개발하면 되고, 단지 몇 주의 세포 배양기간만

을 필요로 하기 때문에 다른 생체조직 공학 기술보다 더 빠르고 경제적이므로 향후 더욱 더 발전될 것으로 기대된다.

3.4. RP를 활용한 인공뼈 제작

중국 Xi'an Jiaotong 대학에서는 hemi-knee 조인트를 제작하였다. 이는 CT 이미지를 바탕으로 환자에 맞추어 설계되었으며, 실제 제작된 조인트는 티타늄 합금(titanium alloy)과 다공성 바이오 세라믹(porous bioceramic)으로 이루어져있다. 대퇴부의 CT 이미지를 이용하여 3D 자유곡면(freeform)모델을 제작하였으며(Figure 7), 인공뼈는 250-300 μm의 다공성을 가지도록 설계되었다. hemi-knee 조인트와 인공뼈를 제작하기 위해 에폭시(epoxy) 레진 틀을 SLA 방법으로 제작하였다. hemi-knee 조인트를 제작하기 위한 에폭시 몰드를 주조(casting) 방법을 이용하여 티타늄 합금으로 제작하였다(Figure 8). 이와 비슷한 방법으로 인공뼈의 네거티브 패턴으로 몰드를 제작 한 후 파우더 소결(powder sintering) 방법을 이용하여 다공성의 바이오 세라믹으로 이루어진 인공뼈를 제작한다(Figure 9). Figure 10은 제작된 인공뼈의 다공성을 보인 것이며, Figure 11은 조립된 hemi-knee 조인트이다. 제작된 조인트를 3주간 개에 이식하여 체내

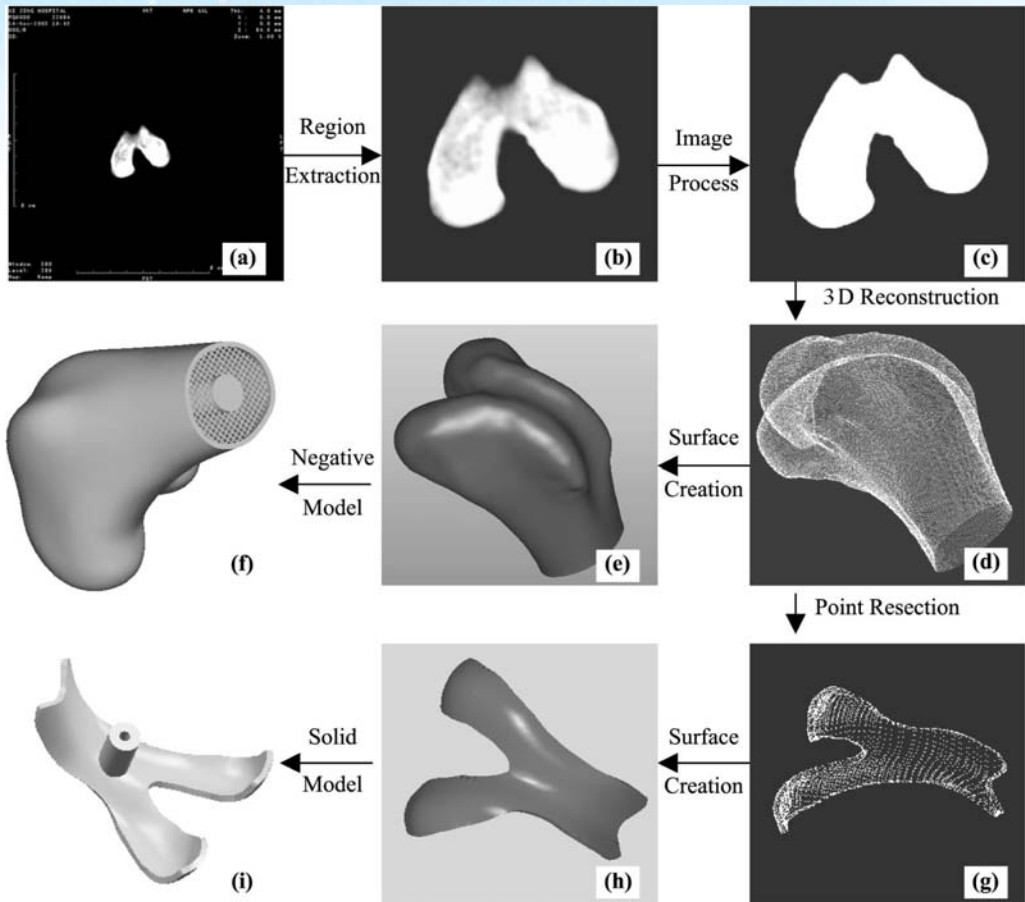
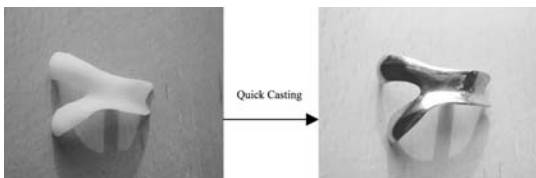
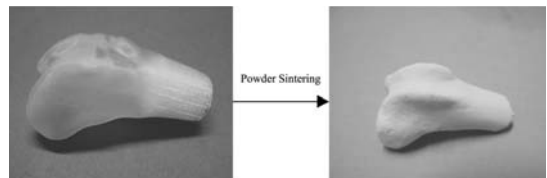


Figure 7. (a) CT이미지, (b) 추출된 이미지, (c) 바이너리(binary) 이미지, (d) 점으로 이루어진 대퇴부 형상, (e) 대퇴부 자유곡면, (f) 인공뼈의 네거티브(negative) 모델, (g) 점으로 이루어진 hemi-knee형상, (h) hemi-knee 조인트의 자유곡면, (i) hemi-knee 조인트의 솔리드 형상



(a) RP 로 제작된 hemi-knee 조인트
(b) 티타늄 합금 hemi-knee 조인트
Figure 8. 퀵 캐스팅 (quick casting)을 이용한 티타늄 합금 hemi-knee 조인트 제작



(a) 네거티브 패턴으로 된 인공뼈 몰드
(b) 다공성 바이오 세라믹 인공뼈
Figure 9. 파우더 소결을 이용한 다공성 인공뼈 제작

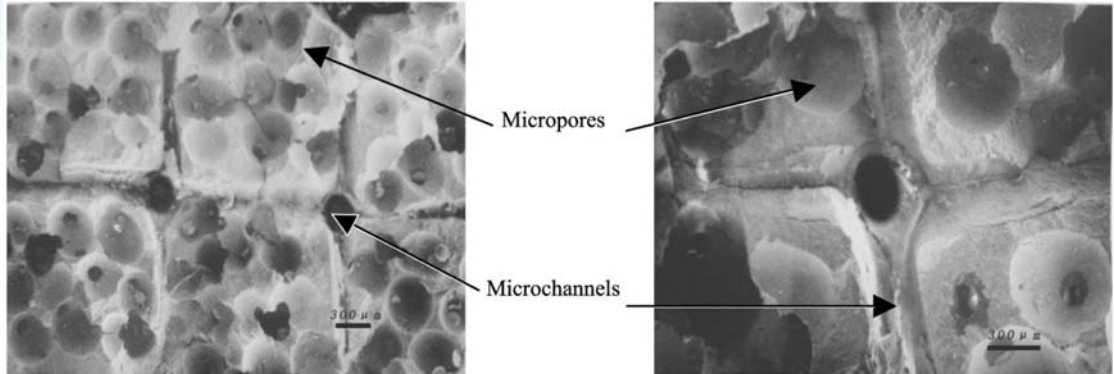


Figure 10. 제작된 인공뼈의 다공성

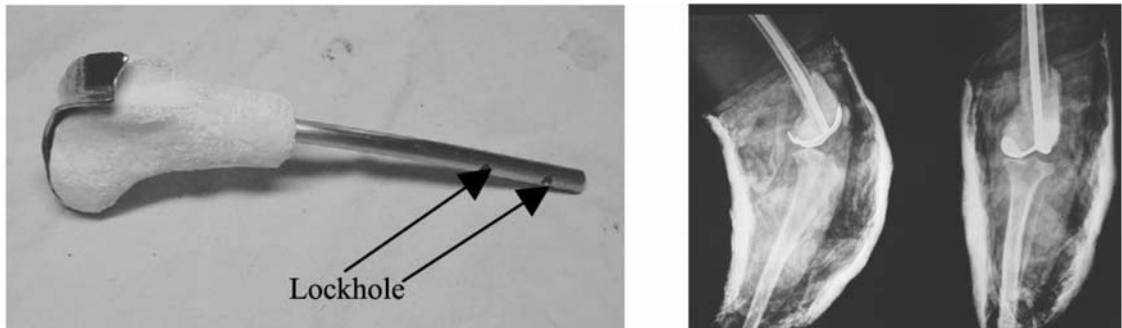


Figure 11. 조립되어 개에 이식된 hemi-knee 조인트

(*in vivo*) 실험을 수행 하였으며, 조직과 잘 조화되며, 조인트로서의 기능을 잘 수행할 수 있는 것으로 평가되었다.

4. 맺음말

RP 기술은 의학 분야에서 다양하게 이용되고 있으며, 적용에 있어서 큰 잠재력을 가지고 있다. 수술 계획, 시뮬레이션, 교육, 생체조직의 모델 제작, 보철과 임플란트, 바이오역학, 생체조직 공학 등에서 RP가 사용되고 또한 연구되고 있다. RP 기술의 발전과 더불어서 병원에 근무하는 의사와 외과 전문의들은 예전에는 상상만 가능했던 일들을 현실화할 수 있는 시대

를 맞이하게 되었다. 하지만, 아직은 적용 및 응용 연구에 있어서 초기 단계이기 때문에 해결되어야 하는 의학적, 기술적인 난제들이 많이 있다. 그리고, 이러한 문제점들을 해결하기 위해서는 RP 시스템 기술의 발전, 적합한 재료의 개발과 더불어 의학분야에 대한 지속적인 관심과 공동연구가 필요하다. 참고적으로 본 기사의 세부적인 관련 내용은 아래의 각 홈페이지에서 확인할 수 있다.

- NewScientist: <http://technology.newscientist.com/>
- BizOrigin_The Art & Science of Startups: <http://www.bizorigin.com/category/science-technology>

- Objet: <http://www.objet.com/>
- 3d LAB Service GmbH: http://www.3dlabservice.de/eng_index.html
- UCL hospital: <http://www.uclh.nhs.uk/>
- Arcom AB: <http://www.arcam.com/>
- Toyama university: <http://www.u-toyama.ac.jp/>
- Organovo: <http://organovo.com/>
- Rapid Prototyping Journal