한국정밀공학회지 제 23 권 제 11 호 (2006 년 11 월)
Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 23, No. 11, November 2006

◆특집◆ 전통산업과 첨단산업의 창의적 융합을 위한 RP&M 기술 활용

RP&M 기술의 의공학적 활용

안동규*

Applications of Rapid Prototyping and Manufacturing Technologies to Bio-Medical Engineering

Dong-Gyu Ahn*

Key Words : Rapid prototyping (쾌속조형), Rapid manufacturing (쾌속생산), Bio-medical engineering (의공학)

1. 서론

1986 년에 SL (Stereoligthography) 공정이 개발된 이후 현재까지 30 여종 이상의 쾌속조형 (Rapid prototyping: RP) 공정이 개발되고 있다. 쾌속조형공정은 3 차원의 형상을 2 차원의 얇은 층으로 변환하여 연속적으로 한층씩 적층함으로써 복잡한 형상을 가진 3 차원 제품을 빠른 시간에 조형할 수 있다.[1] 역공학 (Reverse engineering: RE) 은 실물 형상을 직접식 또는 비접촉식으로 측정하여 CAD 데이터화 함으로써 CAD 데이터가 없는 제품의 CAD 데이터 구축과 제적된 제품의 치수와 형상 특성 평가에 매우 용이하다.[2] 쾌속조형공정과 역공학의 기술적 융합은 원 제품의 손상과 엔지니어링 노력을 최소화하고 실물 형상의 제품을 빠른 시간내에 복제 할 수 있는 장점을 가지고 있다.[3] 이러한 쾌속조형과 역공학의 기술적 융합을 효율적으로 적용할 수 있는 분야중 하나가 의공학 (Bio-medical engineering) 분야이다. 의학분야에서 환자의 환부 초기 상태 판단을 위하여 촬영하는 CT 와 MRI 데이터의 경우 쾌속조형공정의 초기 데이터인 슬라이싱 데이터와 같이 일정간격 (1-3mm 정도) 의 층별 데이터로 구성되어 있어 각층 데이터를 이용하여 3 차원 형상을 CAD 적으로 복원해 내면 쾌속조형공정에 직접 적용할 수 있다.[4]

한편, Terry Wohler 의 쾌속조형 및 생산 관련 전세계 시장 동향에 대한 보고에 의하면 Fig. 1 과 같이 의공학 분야가 쾌속조형공정 적용분야중 차지하는 비율이 10 % 이상을 꾸준하게 유지하고 있다.[5] 또한, 2004 년 이후 자동차 산업에서의 쾌속조형공정 적용이 현저히 감소하고 있는데 반하여 의공학 분야에 대한 적용은 증가세가 두드러지고 있다.

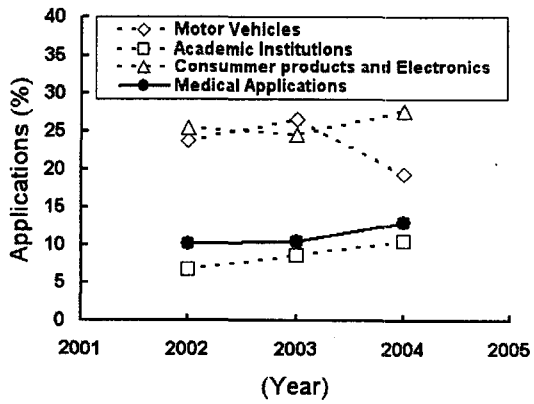

Fig. 1 Application area of rapid prototyping

* 조선대학교 기계공학부 대학원
Tel. 062-230-7234, Fax. 062-230-7234
Email smart@mail.chosun.ac.kr
쾌속조형/쾌속툴링/쾌속생산, CAD/CAM/CA, 초경량 신소재 개발 및 레이저 응용 가공에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

쾌속조형공정의 의공학 분야 적용이 증가되고 있는 이유는 최근 의공학 분야에서 수술시간, 수술 정확성 및 유병율 등의 개선과 환장에 대한 위험성, 고통감소 및 수술오류에 의한 재수술 최소화를 위하여 컴퓨터 응용 수술 (Computer-assisted surgery) 기법들이 개발되고 있는데, 컴퓨터 응용 수술기법의 한가지 대안으로 제시되고 있는 분야가 CT/MRI 데이터를 이용한 역공학과 쾌속조형공정의 기술적 융합을 활용한 수술기법이기 때문이다.[6]

본 특집에서는 국내외 주요 역공학과 쾌속조형공정의 기술적 융합을 의공학 분야 적용한 예들을 기술하고자 한다. 또한, 쾌속조형 및 쾌속생산기술을 활용한 의공학 기반의 다학제간 연계 기술개발의 방향을 모색하고자 한다.

2. 의공학용 쾌속조형모델 제작 원리

CT 및 MRI 데이터를 이용한 의공학용 3 차원 형상 제작과정은 Fig. 2 와 같이 CT/MRI 측정, 3 차원 표면 형상 복원, 슬라이싱 및 적층 경로 생성 및 쾌속조형의 4 단계로 구성된다.[7]

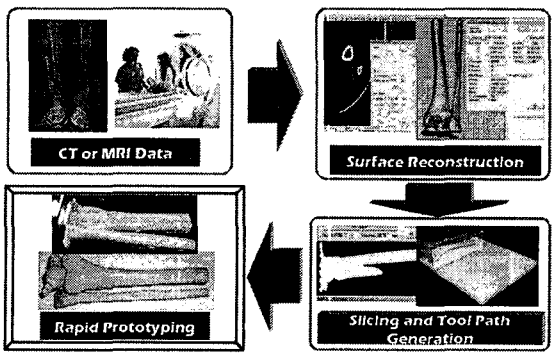

Fig. 2 Manufacturing procedure of three dimensional parts using CT and MRI data

CT 및 MRI 측정단계에서는 일정간격으로 측정된 CT 및 MRI 데이터를 DICOM 데이터 형식으로 저장하여 초기 데이터를 생성한다.

3 차원 표면 형상 복원에서는 DICOM 형식으로 저장된 데이터를 형상 복원 프로그램 불러들여, 데이터 노이즈 필터링을 수행하고 외부 윤곽데이터를 매끄럽게 한 후 각 층의 윤곽데이터를 이용하여 3 차원 복원을 수행하여 표면 데이터를 생성한다.[8,9] 그 후, 이 데이터를 .stl 데이터로 저장한다. 일반적으로 이 과정에 대해서는 MIMICS S/W[10] 가 많이 사용되고 있으며, 이 .stl 데이터의 수정 및 후처리에는 Magic RP S/W 가 많이 사용된다.

슬라이싱 및 적층 경로 생성단계에서는 앞 단계에서 생성된 최종 .stl 데이터에 적합한 조형 방향, 지지대 위치, 슬라이싱 방법 및 적층 도구의 이동 경로를 결정한다. 이 단계는 적용되는 쾌속조형장치에 따라 매우 의존적이며, 각 쾌속조형장치별로 각각의 전용 S/W 를 가지고 있다.

쾌속조형단계는 최적 조형 경로가 생성된 데이터를 쾌속조형장치에 입력하여 실제 제품을 조형하는 단계이다. 슬라이싱 된 한 층에 대하여 형상을 생성하고 동시에 이전 층 (Previous layer) 에 접착하는 과정을 반복하여 제품을 제작한다.

3. 쾌속조형 공정의 의공학적 적용

쾌속조형 공정의 의공학적 적용은 크게 인체 내부 형상의 3 차원 실물 가시화를 통한 사전 수술 계획 수립 및 사전 교육, 인체 적응형 임플란트 보철 분야, 의공학적 시험분석 분야 및 인체 형상 복원과 기능성 의약 시스템 제작 분야에서 널리 이루어지고 있다.

3.1 쾌속조형 공정의 사전 수술 계획 수립 분야 적용

쾌속조형 공정의 사전 수술 계획 수립 분야의 주요 적용 내용은 제작된 인체 내부 형상의 쾌속조형 모델을 이용하여 수술 대상의 내부 인체 구조의 특성 분석, 임플란트 (Implant) 의 사전 성형 및 수술 가이드 (Guide) 와 형판 (Template) 사전 제작, 수술 절차 사전 분석, 보철의 사전 장착성 평가 및 이들 데이터를 이용한 수술자 사전 교육 등 이다.

3.1.1 쾌속조형 모델을 이용한 내부 인체 구조 특성 분석

쾌속조형으로 실물 형상의 인체 형상을 제작하고, 이 실물 모델을 이용하여 수술 대상물의 복잡한 기하학적 특성이나 혈관 분포 및 손상 가능 부위등을 분석한다. 이를 통하여 수술 절차의 사전 분석, 최적 수술 경로 선정 및 수술자의 사전

교육을 수행하게 된다. 이러한 분석은 미세 혈관이 수십 군데에 연결되어 있다거나 신체의 기형적 특성이 많은 경우에 활용도가 매우 높다.

이 분야에 대한 최초의 쾌속조형 모델 활용중 하나는 1992 년에 Mankovich 등에 의해 수행된 SLA 모델을 이용한 사전 수술 계획 수립 관련 연구이다. [11] 영국 Imperial College 의 Bio-mechanics Section 에서 수행한 대퇴부 관골구의 수술시 파손부의 기하학적 형상 분석 및 추가 파손 예상부위 분석을 위하여 같은 SLA 모델이 제작 되었다. [12]

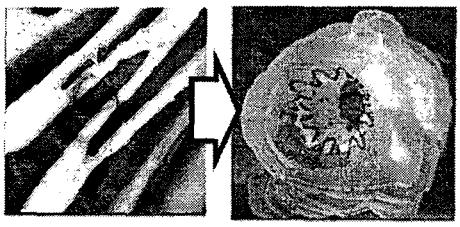

Fig. 3 Applications of pre-operative visualization and planning (Stent graft) [13]

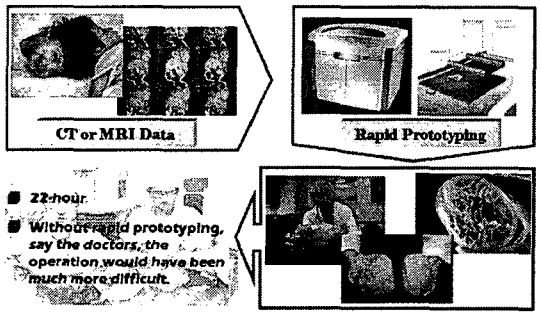

Fig. 4 Applications of pre-operative visualization and planning (Twin surgery, Courtesy Sysopt Ltd.) [14]

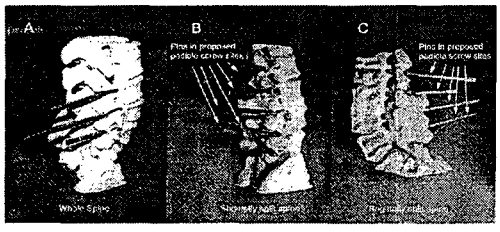

Fig. 5 Applications of pre-operative planning (Spine) [15]

Winder 등은 Fig. 3 과 같이 복부 대동맥류에 대한 스텐트 (Stent) 이식시 최적 스텐트 위치 결정을 위하여 SLA 모델을 제작하였다. [13] UCLA 의 마이텔 아동병원 (Mattel Children's Hospitoal) 에서는 Fig. 4 와 같이 샴 쌍둥이 (Twin) 수술시 MRI 데이터로 샴 쌍둥의 머리부를 정밀 측정한 후, 이 데이터로 3 차원 형상 복원을 수행하고 이 복원된 데이터를 이용하여 Objet 공정으로 수술부인 머리부의 쾌속조형 모델을 제작하여 사전 수술 계획 수립과 수술자 교육을 수행하여 22 시간 만에 성공적인 수술을 수행한 바 있다. [14] New Mexico 대학에서는 Fig. 5 와 같이 척추 나사 삽입을 위한 사전 수술 계획 수립시 Thermojet 제작된 척추 실물모델을 사용하였다. [15]

국내에는 염진섭등에 의하여 전방 심자 인데 등장점 확인에 Z-CORP 으로 제작된 무릎 관절 모델을 활용하였다. [16]

3.1.2 쾌속조형 모델을 이용한 임플 사전 성형 및 가이드/형판 사전 제작

임플란트의 사전 성형 및 수술 가이드 (Guide) 와 형판 (Template) 사전 제작에서는 쾌속조형 된 인체 내부 형상의 실물모델을 이용하여 인체 형상에 적응하도록 임플란트를 사전 성형하고, 이 임플란트를 실물 모델에 장착 시켜 임플란트가 장착된 실물 모델 위에서 수술 가이드와 형판을 제작한다. [17] 그러므로써 임플란트 뿐만 아니라 수술가이드와 형판 모두가 인체 적응도가 높아 추후 수술시 최소 침습적 피하 금속판 골유합술 (Minimal invasive percutaneous plate osteosynthesis : MIPO) 이 가능하다. 또한, 수술시 임플란트와 대상 인체 형상 사이의 강제 체결 간격이 매우 작게 되어 인체 형상과 임플란트 체결부 사이에 발생하는 잔류 응력이 최소화되어 환자가 고통을 적게 느낄 뿐만 아니라, 체결부 마모로 인한 체결부 재 수술의 시간이 매우 길어지는 장점이 있다. 한편, 좌우 대칭성이 높은 신체 일부가 많이 파손된 경우에 파손되지 않은 경우, 파손 되지 않은 인체 형상을 측정한 후 이 데이터를 거울 대칭 변환하여 파손된 인체의 원형 형상을 복원하고 이 형상을 이용하여 임플란트 사전 성형 및 수술 가이드와 형판을 제작하는 방법에 대한 연구가 최근 이루어지고 있다.

New Mexico 대학에서는 Fig. 6 와 같이 골반부 파괴시 Thermojet 으로 골반부 모델을 제작한 후, 이 모델을 이용하여 임플란트의 사전 성형과 형판 부착 위치 선정 및 인체 적응형 드릴 가이드 판을 제작하여 실제 환자 수술에 적용한 바 있다. [18] 또

한, 척추 고정핀 삽입을 위한 인체 적응형 척추 드릴링 형판 제작시 Thermojet 모델을 사용하였다. K. U. Leuven 에서는 Fig. 7 과 같이 치과 임플란트 시술을 위한 인체 적응형 드릴링 형판을 SLA 모델을 이용하여 제작하여 우수한 수술 결과를 얻었다. [19]

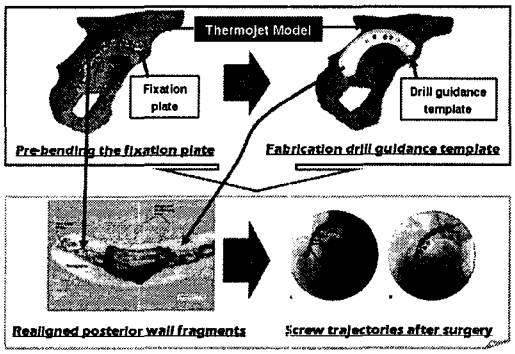

Fig. 6 Examples of pre-forming for implants and manufacturing for fixation plates and drill guidance templates using RP model [18]

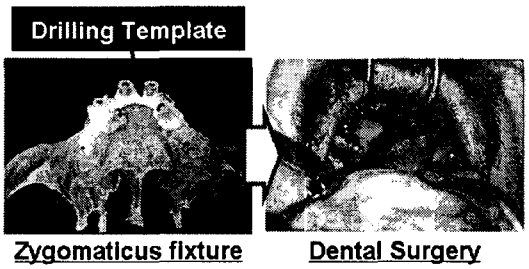

Fig. 7 Application of RP models to manufacture drilling template for dental surgery [19]

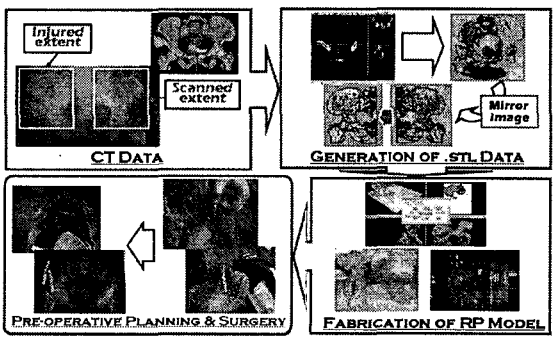

Fig. 8 Application of RP models for pre-bending and pre-operative planning and training of surgeons [20]

국내에는 Fig. 8 과 같이 Ahn 등에 의하여 Objet 로 제작된 3 가지 원형골 모델을 이용한 사전 임플란트 성형, 사전 수술계획 수립 및 수술자 사전교육에 관한 연구가 수행된 바 있다. [20]

3.2 쾌속조형 공정의 인체 적응형 임플란트 보철 분야 적용

쾌속조형 공정의 인체 적응형 임플란트 (Custom made implants) 보철 분야의 적용은 일반적으로 기형의 안면 형상을 가진 인체에 대하여 많이 적용되고 있다. 인체 적응형 임플란트 제작 절차는 일반적으로 다음과 같은 4 단계로 구성된다.

첫째, CT/MRI 측정 데이터를 이용하여 3 차원 CAD 데이터로 인체형상을 복원한 후, 인체 기형이 발생한 부분에 대하여 인체 형상이 심미적으로 보일 수 있도록 CAD 적으로 임플란트를 설계한다.

둘째, 기형을 가진 인체부와 심미적으로 설계된 기형부 임플란트에 대하여 모두 쾌속조형 모델을 제작하여 심미적으로 설계된 기형부 임플란트의 적합성과 심미성을 평가한다.

셋째, 이 평가 결과와 임플란트 고정을 위한 설계를 반영하여 최종 임플란트 CAD 설계를 완료한 후 최종 형상에 대한 기형부 임플란트 쾌속조형 모델을 제작한다.

넷째, 제작된 기형부 임플란트 쾌속조형 모델을 이용하여 쾌속툴링 공정을 수행하여 인체 적응형 금속 임플란트를 제작한다.

Fig. 9 (a) 와 (b) 는 이탈리아의 Twin 대학 병원에서 두부 기형에 대한 인체 적응형 임플란트 제작 절차 적용 예이다. [21]

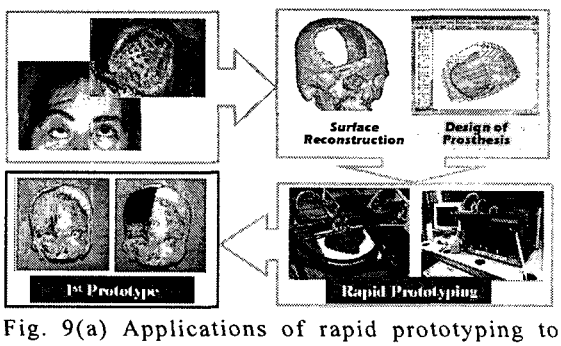

Fig. 9(a) Applications of rapid prototyping to manufacture the 1st prototypes of designed implant and bone with a deformity [21]

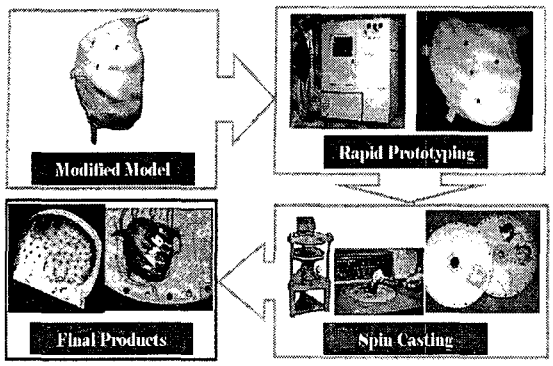

Fig. 9(b) Applications of RP and RT to manufacture the customer made implant for bones with a deformity [21]

Fig. 9 의 예에서는 임플란트의 첫번째 쾌속조형 모델 제작시는 Sander's 사의 Solid Scape 를 사용하였으며, 최종 임플란트 쾌속조형 모델 제작시는 FDM 공정을 이용하였다. 금속 임플란트는 FDM 으로 제작된 원형을 이용하여 회전 주조 (Spin casting) 로 제작하였다. 중국의 장정 대학에서도 Fig. 10 과 같이 선천성 기형 함몰 두부를 가진 소년에 대하여 인체 적응형 임플란트 제작 절차를 적용하여 성공적으로 수술을 마친 것을 보고하였다. [22] 이 예에서는 SLA 로 1 차 쾌속조형 모델을 제작한 후, 이 모델을 이용하여 RTV 몰드를 제작하였다. 그 후 RTV 몰드를 이용하여 인체 적응형 소재인 PMMA 를 이용하여 두부 임플란트를 제작하였다.

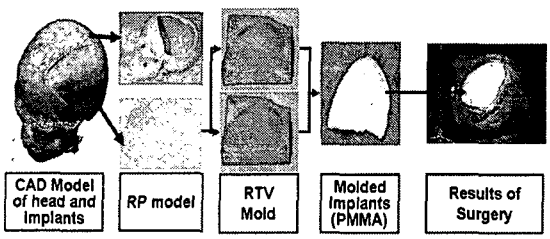

Fig. 10 Application of RP models to manufacture customer made implants [22]

위에서 언급한 방법들은 인체적응형 임플란트를 제작함에 있어 2 차 공정을 이용하는 방법들이 기술되었으나, 최근에는 Fig. 11 과 12 와 같이 스웨덴의 Arcam 사와 한국의 ㈜ 인스텍 등에서 금속 쾌속조형공정을 이용한 직접식 티타늄 인공관절이나 임플란트를 제작하는 것에 대한 연구가 진행되고 있다. [23, 24]

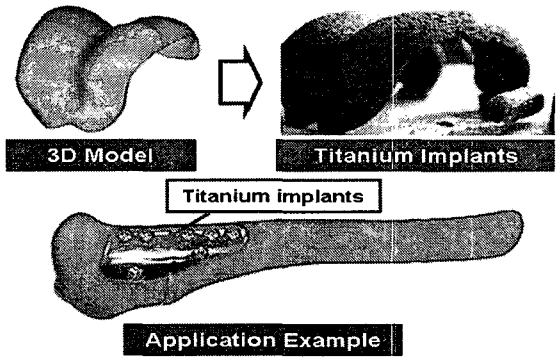

Fig. 11 Examples of titanium implants manufacturing using Arcam EBM process [23]

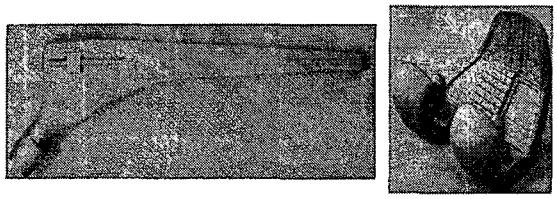

Fig. 12 Examples of titanium implants manufacturing using DMT process [24]

3.3 쾌속조형 공정의 의공학 시험 평가 분야 적용

쾌속조형 공정의 의공학 시험 분석 분야 적용은 쾌속조형을 이용하여 장기나 혈관 모형을 제작한 후, 이 모델을 이용하여 내부 유체 유동 및 압력 변화 특성들을 평가하는 분야에 적용 예들을 찾아 볼 수 있다.

Fig. 13 과 같이 Kim 등은 아데노이드 증식을 가지는 비정상 목구멍의 공기흐름 특성을 쾌속조형으로 제작된 모형과 PIV 를 이용하여 측정/분석하였다. [25] CT 데이터로부터 생성된 3 차원 CAD 모델을 이용하여 Z-CORP 장비로 쾌속조형모델을 제작하였다. 영국의 Leed 대학과 Leed 대학 부속 병원에서는 Fig. 14 와 같이 비정상 대정맥류의 내혈관 보수시 SLA 로 제작된 4 가지 모형에 대하여 유동 및 압력 변화 특성을 평가하여 최종적인 내혈관 보수 모델을 선정하였다. [26]

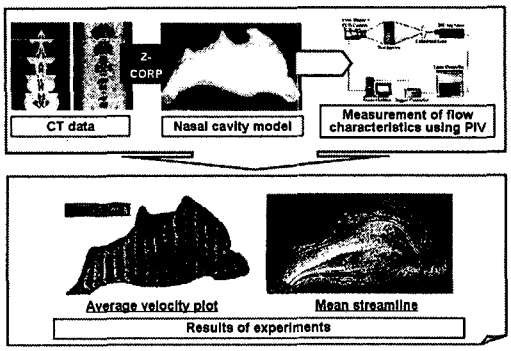

Fig. 13 Application of RP models to examine the airflow characteristics in an abnormal nasal cavity [25]

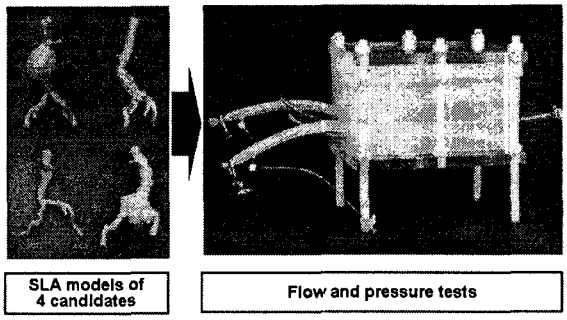

Fig. 14 Application of RP models to simulate the flow and the pressure characteristics of the repaired endovascular [26]

Morgan 등에 의하여 혈관 유동 모형 시험 분석용 모형 제작을 위하여 FDM 공정으로 혈관 모형을 제작한 후 인베스트먼트 주조로 실제 실험용 혈관 모형을 만들어 유동 특성 평가에 적용한 바가 있다. [27]

3.4 쾌속조형 공정의 인체 형상 복원 및 기능성 의약 시스템 분야 적용

쾌속조형 공정의 인체 형상 복원 분야 적용은 인체 외형 재생 (Tissue Engineering) 및 관절 재생을 위한 기초 형상 (Scaffold) 제작에 집중되어 있다. [28]

쾌속조형 공정이 인체 외형 재생에 적용될 경우 손실된 쾌속조형 모델로 기초 형상을 제작하고, 이 기저 형상 위에 생체 재료를 도포하여 인체 외형을 재생한다. 또한, 기초 형상의 경우 쾌속조형 모델을 이용한 쾌속툴링으로 제작하기도 한다. Fig. 15 는 3-DP 공정으로 제작된 귀 형상 모델에 왁스를 함침 (Infiltration) 시켜 제작된 귀 형상 복원용 기초 형상이며 [29], Fig. 16 은 컬러 SLA 공정을 위한 코의 기초 형상 제작 결과이다. [30]

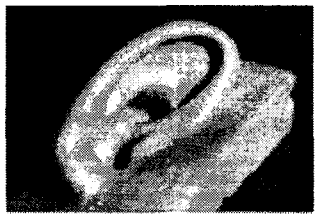

Fig. 15 Manufacturing example of scaffold using 3-DP process and wax infiltration (Ear) [29]

Fig. 16 Manufacturing example of scaffold using a color SLA process (Nose) [30]

영국의 Aberdeen 대학과 Birmingham 대학에서는 공동 연구로 Fig. 17 와 같이 FDM 공정으로 귀 형상에 대한 기초 형상을 제작한 후, 이 기초 형상 위에 생체 재료로 피부층과 표피층을 부착시켜 인공 귀를 제작하여 생체재료의 성장 및 부착 특성을 고찰하였다. [31]

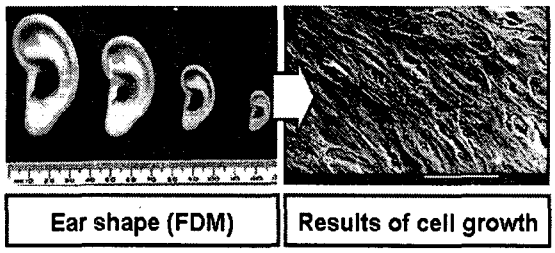

Fig. 17 Manufacturing example of ear shaped scaffold and results of experiments for the cell growth [31]

쾌속조형 공정의 관절 재생 적용은 아직은 매우 기초적인 연구를 수행하고 있는 단계이다. Fig. 18 과 같이 쾌속조형 공정은 주로 관절 재생을 위

한 해면골 형상 설계 및 해면골 형상 제작에 적용되고 있다. [32]

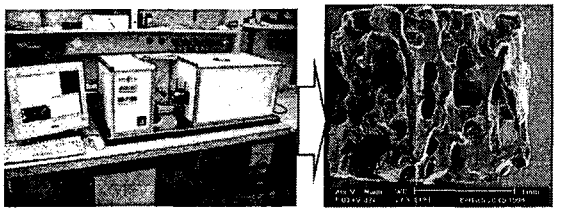

Fig. 18 Application of rapid prototyping process to fabricate the bone scaffold (EPFL and Univ. of Edinburg) [32]

쾌속조형 공정의 기능성 의약 시스템 적용예로써는 생물 분해성 재료를 이용한 기능성 약물 전달 시스템 개발을 들 수 있다. 약물 전달 시스템의 핵심인 표면 드레싱 (Dressing) 할 표면 형상을 생물 분해성 재료로 쾌속제작함으로써 약물 방출 속도를 제어하는 것이 본 적용의 핵심 기술이다. [33]

KAIST 에서는 Fig. 19 와 같은 약물 전달 시스템 개발을 위해 쾌속조형 공정을 이용한 표면 드레싱 형상 제작 방법에 대하여 기초 연구를 수행한 바 있다. [34]

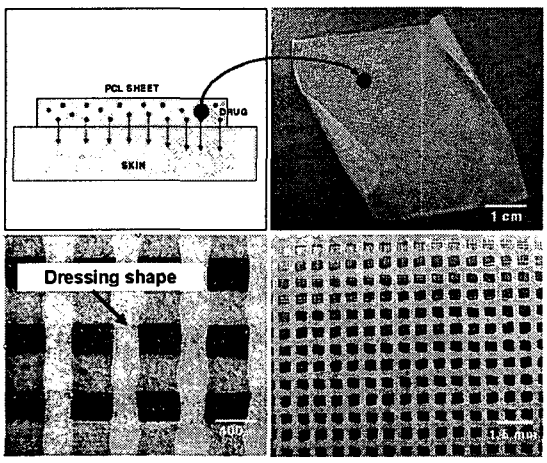

Fig. 19 Application example of rapid prototyping process to manufacture the dressing shape for drug delivery device (KAIST) [34]

4. 쾌속조형 공정의 의공학 분야 적용 기술 개발 방향

쾌속조형 공정의 의공학 분야 적용 기술 개발에 있어 인체 적응형 임플란트/보철 분야 및 인체 형상 복원과 기능성 의약 시스템 제작 분야에 대한 연구가 확대될 것으로 사료된다.

인체 적응형 임플란트/보철 및 인공 관절의 직접식 제작을 위한 티타늄 재료 기반 직접식 금속 쾌속조형 공정 개발이 확대될 것으로 사료된다. 이 경우 Fig. 20 과 같이 지식 데이터베이스와 CT/MRI 기반 3 차원 형상 데이터 복원 시스템 및 쾌속조형시스템이 통합된 지능형 주문적응식 임플란트/보철 및 인공관절 제작 시스템이 개발에 대한 연구가 이루어질 것으로 사료된다.

인체 형상 복원과 기능성 의약 시스템 제작의 경우 쾌속조형 가능한 신체 친화 생체 재료를 개발하는 분야로 연구가 계속적으로 진행될 것으로 사료된다. 또한, 약물 전달 기능 및 생체 부위 기능 확대를 위한 기초 형상 설계 및 쾌속제작 방법에 대한 연구가 많이 될 것으로 사료된다.

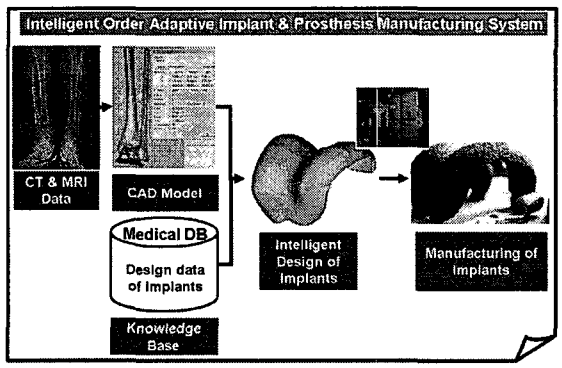

Fig. 20 Concept of intelligent order adaptive implant and prosthesis manufacturing system

쾌속조형 공정의 의공학적 시험분석 분야는 크게 두가지 방향으로 적용범위를 확대될 것이다. 첫째는 티타늄을 이용한 금속 임플란트 및 인공관절 기술이 개발된 여기서 제작된 임플란트와 인공관절을 이용한 인체 구조 강도 및 내구성 특성을 분석하는 구조 기능성 시험분석 분야이다. 둘째로는 Fig. 21 과 같이 CT 데이터를 이용한 3 차원 모델로부터 인공 관절 및 장기/혈관의 유한요소해석

과 쾌속조형 모델을 이용한 실물 실험 수행 결과를 비교/분석하여 결과를 도출하는 동시 공학적 시험분석 분야이다.

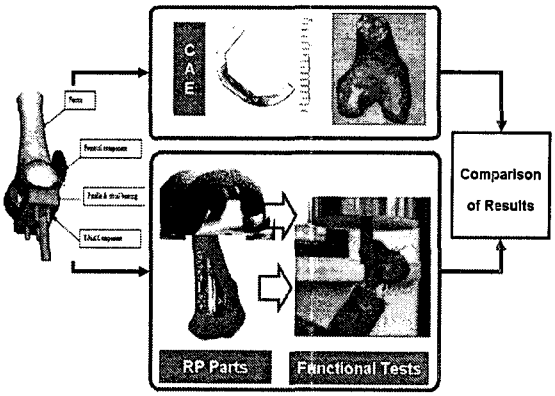

Fig. 21 Concurrent investigation of implant properties using computer aided engineering and functional testing

5. 결론

쾌속조형공정이 개발된 지 20 년이 지난 지금 쾌속조형공정은 자동차 산업, 전자산업, 교육 분야 및 의공학 분야 등에 매우 폭넓게 적용되고 있다. 특히, 최근에 의공학 분야에 대한 쾌속조형공정 적용에 대한 성장세가 두드러지고 있다.

쾌속조형 공정을 이용한 인체내부 형상의 3 차원 실물 가시화를 통한 사전 수술 계획 수립 및 사전 교육의 경우 해부학적 형상이 복잡한 곳에 대하여 적용하거나 MIPO 를 가능케 하여 수술 효율 및 정확성을 현저히 증가시킬 수 있어 앞으로 활용도가 높을 것으로 사료되나 추후 기술개발의 발전은 거의 없을 것으로 사료된다.

쾌속조형 공정의 인체 적응형 임플란트 및 보철 분야 적용은 티타늄 재료를 이용한 지능형 주문 적응식 금속 임플란트/보철 및 인공관절 제작 관련 기술개발이 폭넓게 이루어질 것으로 사료된다.

의공학적 시험분석 분야에 대한 쾌속조형 공정의 적용은 금속 임플란트 및 인공관절의 직접식 정/동적 특성 분석과 CAE 와 쾌속조형모델을 이용한 동시공학적 인체 각부 기능성 분석과 최적 설계 모델 도출이 두드러진 적용분야가 될 것으로 사료된다.

인체 형상 복원과 기능성 의약 시스템 제작 분야에 쾌속조형공정은 신체 친화 생체 재료를 이용한 생체 부위 증식 특성이 좋은 기초 형상 설계/제작 기술 개발 및 고효율 약물 전달을 위한 기능성 표면 형상 설계/제작 기술개발에 폭넓게 적용될 것으로 사료된다.

특히, 인체 적응형 임플란트 및 보철 개발 분야와 인체 형상 복원 및 기능성 의약 시스템 제작 분야의 경우 기계공학적 지식을 기반으로 한 의공학과의 연계를 통하여 서로의 분야에서 Win-Win 할 수 있는 학문적/산업적 열쇠를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Jacobs, P. F., "Stereolithogrpahy and Other RP&M Technologies from Rapid Prototyping to Rapid Tooling," ASME Press, 1996.
2. Choi, H. R., Jun, Y., Chang, M., Rho, H. and Park, S., "A Reverse Engineering System for Reproducing a 3D Human Bust," Proceedings of 2003 Spring Conference on KSPE, pp. 15-19, 2003.
3. Lee, S. H., Ahn, D. G, Kim, H. C, Yang, D. G., Park, D. S. and Chae, H. C, "Rapid Manufacturing of 3D Prototype from 3D Scan Data using VLM-ST," Proceedings of 2002 Spring Conference on KSPE, pp. 536-539, 2002.
4. Kai, C. C., Meng, C. S., Ching, L. S., Hoe, E. K. and Fah, L. K., "Rapid prototyping assisted surgery planning," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 14, pp. 624 - 630, 1998.
5. Wholer, T., "Wholers report 2005, Rapid Prototyping & Tooling State of the Industry," Wholers Associates Inc., 2005.
6. Goto, M., Katsuki, T., Noguchi, H. and Hino, N., "Surgical Simulation for Reconstruction of Mandibular Bone Defects Using Photocurable Plastic Skull Modes : Report of Three Cases," Journal of Oral & Maxillofacial Surgery, Vol. 55, pp. 772 - 780, 1997.
7. Gopakumar, S., "RP in Medicine: a Case Study in Cranial Reconstructive Surgery," Rapid Prototyping

Journal, Vol. 10, No. 3, pp. 207 - 211, 2004.
8. Ma, D., Lin, F. and Chua, C. K., "Rapid Prototyping Applications in Medicine. Part 2: STL File Generation and Case Studies," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 18, pp. 118 - 127, 2001.
9. Ryu, J. H., Kim, H. S. and Lee, K. H., "Contour Based Algorithms for Generating 3D Models from CT Images," Journal of Korean Society of Precision Engineering, Vol. 20, No. 4, pp. 174 - 181, 2003.
10. www.materialise.com
11. Stocker, N. G., Mankovitch, N. J. and Valentino, D., "Stereolithographic models for surgical planning : preliminary report," Journal of Oral & Maxillofacial Surgery, Vol. 50, pp. 446 - 471, 1992.
12. Potamianos, P., Amis, A. A., Forester, A. J., McGurk, M. and Bircher, M., "Rapid prototyping for orthopaedic surgery," Proceedings of the Institute Mechanical Engineering Part H : Journal of Engineering in Medicine, Vol. 212, pp. 383-393, 1998.
13. Winder, R. J., Sun, Z., Kelly, B., Ellis, P. K. and Hirst, D., "Abdominal Aortic Aneurysm and Stent Graft Phantom Manufactured by Medical Rapid Prototyping," Journal of Medical Engineering, Vol. 26, No. 2, pp. 75 - 78, 2002.
14. http://www.sysopt.com
15. Brown, G. A., Firoozbaksh, K., Decoster, T., Reyna, J. R. and Moneim, M., "Rapid Prototyping : The Future of Trauma Surgery ?," Journal of Bone and Joint Surgery, Vol. 85-A, Supplement 4, pp. 49-55, 2003.
16. Yeom, J. S., Lee, K. W., Kim, M. H., Kim, Y., Kim, N., Lee, J. B. and Choy, W. S., "Surgical Simulation for Placement of Isometric Point of Anterior Cruciate Ligament : A System Using Three-dimensional Computer Models and Rapid Pprototyping Models," Journal of Korean Orthopeadic Association, Vol. 37, No. 5, pp. 600-605, 2002.
17. Kermer, C., "Preoperative Stereolithographic Model Planning in Craniomaxilofacial Surgery," Phidias Letter, No. 2, pp.1-3, 1999.
18. Brown, G. A., Brenton, M. and Firoozbaksh, K., "Application of Computer-Generated Stereolithography and Interpositioning Template in Acetabular Fracture: A Report of Eight Case," Journal of Orthopaedic Trauma, Vol. 16, No. 5, pp. 347-352, 2002.
19. Van Brussel, K., Lauweryns, Ph., Vander Sloten, J., Van Audekercke, R., Fabry, G., Wouters, K. and Swaelens, B., "A Medical Image-based Drill Guide for Pedicle Screw Insertion: Results of a Cadaver Study and Three Clinical Trials," Phidias Letter, No. 3, pp.14, 1999.
20. Ahn, D. G., Lee, J. Y., Yang, D. Y. and Han, G. Y., " Investigation into the Development of Technology for Orthopeadic Surgery Utilizing Reverse Engineering and Rapid Prototyping technology," Journal of the Korean Society of Precision Engineering , Vol. 21, No. 6, pp.188-196, 2004.
21. http://www.prm.ucl.ac.be/cours/meca2455/cours_02-03
22. Lee, M. Y., Chang, C., Lin, C. C., Lo, L. J. and Chen, Y. R., "Custom Implant Design for Patients with Cranial Defects," IEEE Engineering in Medicine and Biology, Vol. 21, No. 2, pp. 38-43, 2002.
23. http://www.arcam.com
24. http://www.inssteck.com
25. Kim, S. K. and Son, Y. R., "Investigation on Airflows in Abnormal Nasal Cavity with Adenoid Vegetation b Particle Image Velocimetry," KSME International Journal, Vol. 18, No. 10, pp. 1799-1808, 2004.
26. Berry, E., Kessel, D., Marden, A., Scott, J. and Dalgrno, K., "Flexible Tubular Replicas for Simulation of Endovascular Repair of Abdominal Aortic Aneurysms," Phidias Letter, No. 7, pp.10-11, 2001.
27. Morgan, R., Connel, M., Wardlaw, J., Bastin, M., Ramnarine, K., Sutcliffe, C., Black, R., Greated, C., Cosgrove, J. and Hoskins, P., "The Use of Rapid Prototyping in Vascular Flow Phantoms: A Preliminary Report," Phidias Letter, No. 7, pp.3-4, 2001.
28. Sun, W. and Lal, P., "Recent Development on Computer Aided Tissue Engineering," Computer Methods and Programs in Biomedicine, Vol. 67, pp.85-103, 2002.
29. Gebhardt, A., "Rapid Prototyping Based Manufactruing of Design and Facial Prostheses,"

Phidias Letter, No. 4, pp.4-5, 2000.
30. Zeilhofer, H. F., Sader, R., Kliegis, U., Kirst, B., Schorner, J., Kadegge G. and Nuber, B., "Models by 3D-Ultrasound," Phidias Letter, No. 5, pp.1-4, 2000.
31. Cai, H., Azangwe, G. and Shepherd, D. E. T., "Skin Cell Culture on an Ear-shaped Scaffold Created by Fused Deposition Modeling," Bio-Medical Materials and Engineering, Vol. 15, pp.375-380, 2005.
32. Franz, I. G., "Rapid Prototyping a Trabecular Scaffold," Reports of Group Training Project: Bone Tissue Engineering, University of Edinburg, 2001.
33. Katti, D. S., Robison, K. W., Ko, F. K. and Laurencin, C. T., "Bioresorbable nanofiber-based systems for wound healing and drug delivery: Optimization of fabrication parameter," Journal of biomedical materials research Part B, Applied biomaterials, Vol.70B, No.2, pp.286-296, 2004.
34. Park, S. H., Kim, H. C. and Yang, D. Y., "Investigation into the fabrication of scaffolds using bio-compatible polymer," Proceedings of 2002 Spring Conference on KSPE, pp. 231-235, 2005.