

역설계 및 Rapid prototyping(RP) technique의 선천성 심장병 수술 시뮬레이션에의 적용

발행인 _ 정희승 _ 홍익대학교 기계시스템디자인공학과 _ haseung@hongik.ac.kr

1. Introduction

선천성 심장병 (congenital heart disease, CHD)의 성공적인 치료에는 심장을 비롯한 주요 혈관의 해부학적 구조의 정확한 이해가 필수적이다. Multislice Computed Tomography(MSCT)나 Magnetic Resonance Imaging(MRI)와 같은 삼차원 진단 양상이 CHD의 시각화를 가능하게 해주었지만, 3D 이미지와 실제 구조와는 여전히 많은 차이가 있다. 만약, CHD의 복잡한 해부학적 구조를 실제 모형으로 제작할 수 있다면 이 문제는 해결될 수 있을 것이다.

Stereolithography는 Rapid prototype (RP) 기술의 일종으로 자외선 빔이 감광성의 액체 플라스틱을 선택적으로 중합하고 응결시킨다. 이 기술을 이용하면 3차원의 입체 이미지를 공간지각적으로 강화된 해부학적, 병리학적인 플라스틱 모델로 변환할 수 있다.

Stereolithography는 정형외과 수술, 두개안면 수술, 신경외과 수술 등 여러 의료 분야 시뮬레이션 수술에 적용되어왔다. 하지만, 이 기술은 최근까지 수축하는 심장과 복잡한 혈관들의 3차원 이미지를 얻는 것이 쉽지 않았기 때문에 심장혈관계 분야에선 그리 널리 적용되지 못했다.

그러나, 최근 고안된 MSCT 혈관조영술은 해상도 높은 CHD의 3차원 이미지를 얻는 것을 가능하게 하여 심장과 혈관계의 플라스틱 복제품을 만드는 데 적합하다. 한편, 해부학적, 병리학적으로 선천적 심장 이상을 이해하기 위한 RP 기술의 가능성과 유용성은 이들 다룬 여러 보고서에서도 발표되었지만, 지금까지 거의 모든 stereolithographic biomodel은 단단한 고체로 제작되어 가상 수술에 적합하지 않았다. 본 논문에서는 Stereolithographic biomodelling이 CHD의 surgical simulation에 실질적으로 적용 가능한 지 파악하기 위해 solid epoxy와 rubber-like 우레탄으로 flexible한 복제품의 제작 가능성을 평가해보았을 뿐 아니라, 이 기술의 실용성과 한계를 평가하고 토의해보았다.

2.1. Image acquisition and image reconstruction

유아나 신생아들에게 진정제를 투여 후 MSCT(Philips Brilliance CT 64 or Toshiba Aquilion 16) 혈관조영술을 수행하였다. 나이와 몸무게에 따라 100-300mA의 유효 전류와 80-120kV의 전압을 설정한 흉부 스캔도 수행되었고 Imige alalyser(ZIO M900, Amin, Tokyo, Japan)를 이용해 복원 너비 0.5mm로 3차원 이미지를

복원했다.

2.2. Stereolithography

MSCT로 얻은 입체 데이터를 이용해 12개의 stereolithographic biomodel를 제작하였는데, 심장과 혈관의 3차원 이미지는 이미지 분석기로 관심있는 부분을 선택해서 얻었다. (그림 1A)

Volume-rendering을 stereolithography 과정에 적용시키기 위해 연속적인 axial tomographic 이미지가 volume-rendering 이미지로부터 1.0mm 간격으로 생성되었다. 그것들을 tiff 파일로 저장하여 stereolithography biomodelling company (JMC, Yokohama, Japan)로 이동한 데이터는 대략 신상아의 40-50개 연속 axial tomographic 이미지와 유아와 어린아이의 70-80개 이미지로 이루어졌다.

Serial tomographic data는 사무리 작업 후 3차원 입체 데이터로 재생성 되어 STI. 파일로 저장되고, 자외선 레이저 빔이 감광성의 액체 플라스틱을 선택적으로 중합하도록 안내한다.

두 가지 타입의 biomodel을 제작했는데, 딱딱한 모형은 solid epoxy (그림 1D, 2B 와 D; viscosity = 300, tensile strength = 78 MPa, tensile modulus = 2.8 GPa,

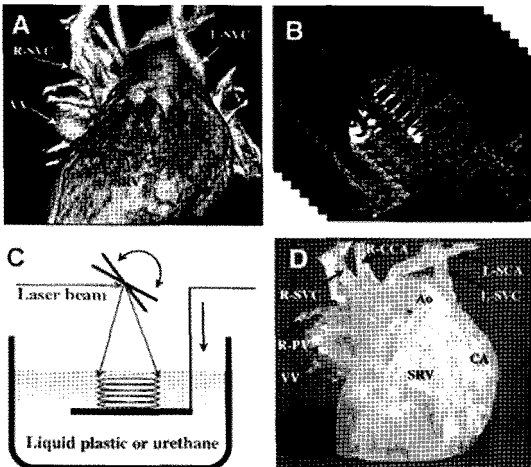


그림 1. CHD의 stereolithographic biomodel 제작 과정

n = 8)를 사용. 유연한 모형은 rubber-like urethane(그림 3A—D; viscosity = 1040, tensile strength = 3.8 MPa, tensile modulus = 0.01 GPa, n = 4)로 각각 제작하였다. 모든 모델은 0.0625mm로 제작하였다. 이렇게 제작된 두 가지 모형은 각각 해부학적 진단 분석과 수술 과정의 시뮬레이션에 적용되었다.

3. Results

모두 12개의 CHD의 biomodel이 구현되었고, 식별을 위해 각 표본의 시각적, 촉각적 검사가 이루어졌다. 대표적으로 복잡한 CHD의 solid epoxy biomodel의 그림 2에 나와 있다. 그림 2A와 B는 multislice CT image (그림 2A)와 이를 바탕으로 제작된 대동맥 협착증이 있는 2달 된 유아의 biomodel을 보여준다.

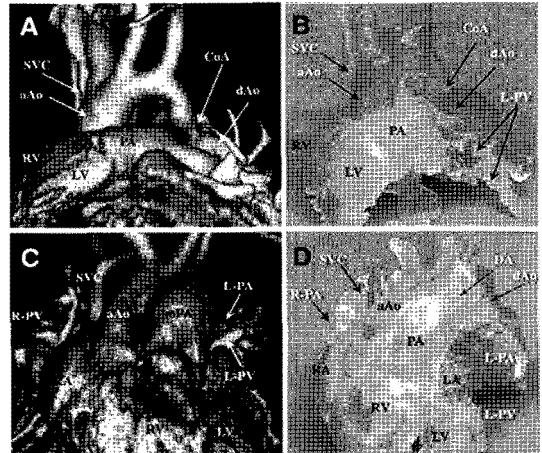


그림 2. Multislice CT images (A and C)와 제작된 biomodels (B and D).

대동맥 궁 형성 부전과 극심한 대동맥 협부 협착증이 stereolithography로 명료하게 재현되었다. Ductal tissues의 대량 제거에 따른 대동맥 궁 불합속로이 유아의 수술은 성공적으로 수행되었다. 그림 2C와 D는 양내혈관 우상선 기시증과 폐하 심실중격 결손증이 있는 28일 된 마숙아(몸무게 1800g)의 CT image (그림 2C)와 이로부터 제작된 biomodel(그림 2D)를 나타낸

다. 구심실공과 동맥관의 정밀한 공간적 연결은 stereolithography로 정확히 재현되었다. 동맥 전환술, 팽대 심실구멍 폐쇄, 동맥관 결찰 등의 수술이 성공적으로 수행되었다. 고체 수지 biomodel과 같이 Rubber-like urethane biomodel도 complicated CHD를 잘 재현해냈으며, 이 model들은 CHD의 가상 수술을 가능하게 했다. 그림 3은 좌심 형성부전 증후군이 있는 4일 된 신생아의 Norweed procedure 시뮬레이션을 보여준다. rubber-like urethane biomodel은 Norwood procedure의 부분 시뮬레이션이 용이한 반면 절개와 봉합이 쉬웠다.

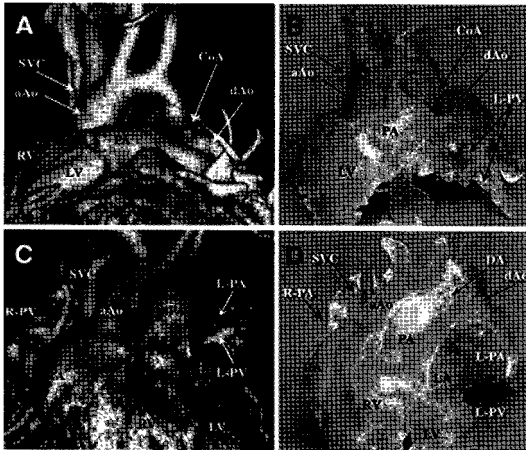


그림 3. (A—D) rubber-like urethane biomodel을 이용한 외과 수술 시뮬레이션

4. Discussion

Stereolithographic biomodel이 정확한 진단과 수술의 시뮬레이션, 그리고 환자에게 복잡한 CHD에 대해 설명하기 좋은 기구가 될 수 있다는 것이 증명되었다. 또한, rubber-like urethane으로 제작한 biomodel은 의사들에게 수술 과정의 절개와 봉합 시뮬레이션을 가능하게 한다는 것도 처음으로 증명하였다. 비록 고체 수지와 유연성 있는 우레탄 biomodel로 수행한 우리의 실험은 고부적이지만, 이의 장점과 단점은 토의되어야 할 것이다.

4.1. Advantages of stereolithography

stereolithographic biomodelling의 주 목적은 복잡한 CHD 수술의 수술 전 계획이다. 이 기술을 이용하면, 수술 전에 환자 개인의 병리적인 변화를 재현할 수 있으므로 개개인의 해부학적 문제점에 접근하기 위한 자세한 토의가 가능해진다. 또한, 가시적인 복제물은 훌륭하고 혁신적인 수술 과정을 설계하는 것을 훨씬 쉽게 만들어 준다. 이 기술은 궁극적으로 도관 시술과 개흉술을 실시하는 더 복잡한 판막 치료나 심장내 수술의 수술 전 계획세우기를 가능하게 해 주며, 혈관과 판막을 생체 공학적으로 설계하는 데 있다.

이 기술은 또한 소아를 비롯한 심장 전문의들의 교육에도 활용될 수 있으며, 가시적인 model은 복잡한 CHD의 실제 구조를 이해하는 데도 도움이 될 수 있다. 이 혁신적인 기술은 잘 보존된 부검 표본이나 숙련된 소아 심장 전문의가 부족한 개발도상국에 살고 있는 CHD로 고생하는 많은 어린이들을 도울 수 있을 것이다.

4.2. Technical limitations

이 방법은 Stereolithography의 해상도(0.0625mm)에 비해서 MSCT 이미지의 해상도와 정확도 때문에 제한적이며, 이미지 분할 과정 중 발생하는 부산물과 부분 용적 효과 등이 가장 주요한 문제점이다. Biomodel의 더 큰 발전을 위해서는 스캔 속도 향상, MSCT detector row를 256이나 320으로 업그레이드 등의 이미지 획득 과정에서의 개선이 이루어져야 할 것이다. 우리의 목표는 판막과 유두근, 비정상적인 근육대, 심실 중격 결손 등의 정확한 biomodel을 생산하는 것으로 the ECG-gated image의 정확도는 꼭 필요하다.

한 개의 모형을 제작하는 데 대략 3-5일 정도의 시간과 US \$400-\$600 정도의 비용이 소모된다.

현재 3D 복원데이터를 stereolithography 제조기로 직접 전송할 수 있도록 소프트웨어를 향상시키려고 노력 중이다. 만약 이 기술이 전체 의료 분야에 널리 퍼



신다면 모형 제작하는 데 드는 비용도 줄어 들 것이다. 비록 우레탄 biomodel이 가상 수술을 가능하게 했을지라도, 이는 유연성과 내구성, 그리고 재료의 질감 등에서 만족스럽지 못하다. 또한, biomodel로 어린이들의 심장과 혈관 등을 가능한 한 사실과 가깝게 제조하기 위해서는 재료의 향상도 불가피하다. 또한, MRI나 초음파와 비교해 MSCT는 고대비 이미지를 제공하지만, 아이들이 이온 방사능에 노출 된다는 것이 MSCT의 주요 문제이다. MSCT 양식의 발전과 최적 방사선 양 세팅으로 방사선 노출을 줄일 수 있을 것이며, MRI나 3D 초음파 심장 검진을 이용한 고대비 이미지의 획득과 이미지 복구 방법 등도 역시 확립되어야 할 것이다.

5. Conclusions

결론으로, 특히 rubber-like urethane을 사용해 만든 stereolithographic biomodelling은 CHD의 수술 전 시뮬레이션이나 개인 수술 과정, 그리고 참신한 수술 절차 계획을 세울 때 유용한 기술이다. 이 기술은 혁신적이며, 결국에는 CHD로 고생하는 많은 아이들을 치료하는 데 중요한 역할을 할 것이다.



본 기사는 홍익대학교 정하승 편집위원이 아래의 논문에서 발췌하였으며, 더 자세한 내용은 아래의 논문을 참조하길 바란다.

I. I. Shiraishi, M. Yamagishi, K. Hamaoka, M. Fukuzawa, T. Yagihara, "Simulative operation on congenital heart disease using rubber-like urethane stereolithographic biomodels based on 3D datasets of multislice computed tomography". European Journal of Cardio-thoracic Surgery, Vol. 37, 2010, pp. 302-306