

# CT 이미지 데이터 및 전산생체역학 해석 기법을 이용한 이차성 기흉 환자의 기낭 표적화 기법 개발

안효영\* · 이상희\*\*

## Development of Bullae Targeting Methodology for Secondary Spontaneous Pneumothorax of Patient-specific Respiratory Lung Motion based on CT Image Data and Computational Biomechanics

Hyo Yeong Ahn\*, Sang Eui Lee\*\*

**Abstract** : In secondary spontaneous pneumothorax (SSP) which needs surgical intervention, it could be difficult to find out the air leak focus because of diffuse adhesion and too fragile lung parenchyme. To prevent unnecessary manipulation and intraoperative lung injury, the ruptured site had better to be predicted preoperatively. Herein, the authors tried to investigate patient-specific respiratory lung motion based on computed tomographic(CT) image data and computational biomechanics.

### 1. 서 론

폐는 인체의 수명이 종료될 때까지 수축과 팽창을 반복하며 매우 복잡한 반복 하중 (정적/동적 인장, 압축, 굽힘, 비틀림 등)을 받게 될 뿐만 아니라, 다양한 재료 특성의 변화(파열, 유착, 허탈 등)가 일어난다.

특히, 장측 흉막(Visceral Pleural) 파열로 인한 기흉(Pneumothorax)은 일반적으로 가슴 통증 및 기침 등을 동반하지만, 결핵, 폐기종 등의 폐질환을 동반한 이차성 자연기흉(Secondary Spontaneous Pneumothorax)의 경우, 폐가 동반된 폐질환으로 인해 일정 폐기능을 수행할 수 없어 호흡곤란으로 이어지는 긴장성 기흉(Tension Pneumothorax) 및 폐허탈(Lung Collapse) 등으로 발전되는 질병으로, 흉관을 삽입하여, 폐팽창을 원활히 한다고 하더라도 지속적인 공기 누출 및 잦은 재발로 수술적 치료가 불가피한 경우가 많다.

하지만, 결핵, 폐기종 등의 기저질환으로 인해 폐 조직이 이미 심한 유착을 가지고 있는 환자이거나, 환자의 전신 상태가 좋지 않아 척추마취 또는 국소마취를 통한 수

술을 시행해야하기 때문에 아주 좁은 수술 시야 및 제한된 움직임만 허용되는 집도의의 입장에서는 터진 기낭을 찾는 것은 더욱 힘들어 진다. 따라서 이러한 수술적 치료를 보완하기 위해서는 폐 손상부 기낭의 표적화 기술 개발이 더욱 절실하다(그림 1).

### 2. 본 론

이에 본 연구는 전술한 세 가지 폐 손상부 기낭 표적화를 위한 핵심기술을 개발한다. 기술개발의 단계는 ① 폐 외부환경 분석 및 폐 손상 발병 인자 탐색을 하고 ② 폐의 유한요소 모델 구축한 후, ③ 폐 손상 시뮬레이션 기법 및 폐 전용 재료 라이브러리 개발하여, ④ 폐 손상 파라메트릭 시뮬레이션을 만들고, ⑤ 폐 손상 발병 메커니즘 규명하여, 폐 손상부 기낭의 표적화까지 완성하는 6단계를 거치며, 전체 연구 프로시저를 요약하여 나타내면 그림 2와 같다.

\* 연세대학교 기계공학부

2.1. 폐의 유한 요소 모델 구축

아직 연구가 진행중이어서, 현재까지 진행된 결과는 아래와 같다. 폐 손상 환자의 의료영상 확보 및 폐 손상량의 정밀 분석하기 위해 수술 대상 환자 278명을 대상으로 폐 손상 환자의 의료영상(CT 이미지)을 확

의 흡기/호기 호흡 패턴에 따른 폐의 수축/팽창

2.1.1. 수행에 대한 문제점 및 개선 방향

당해 연도 연구 내용 중, 환자의 호흡 패턴 분석 및 호흡패턴 기반 폐의 수축 /팽창 경계조건 확보에 많은

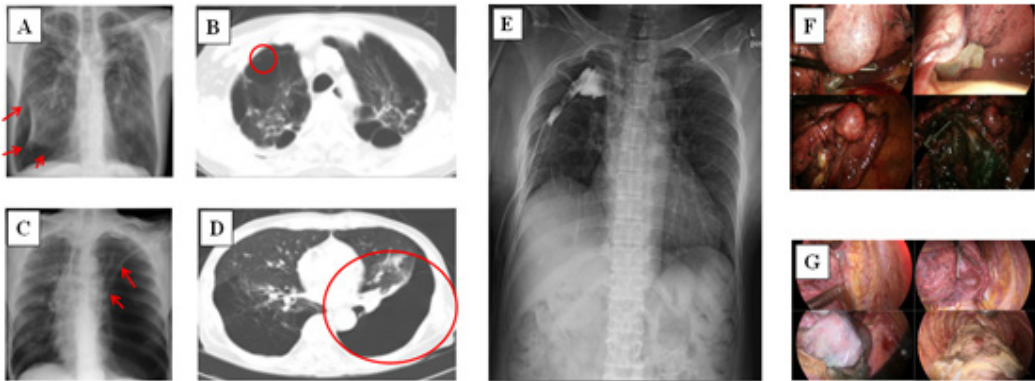


그림 1. (A,B,C,D) 이차성 기흉 환자 및 (E,F,G)접착 제 도포법 및 흉강경 삽입술 예.

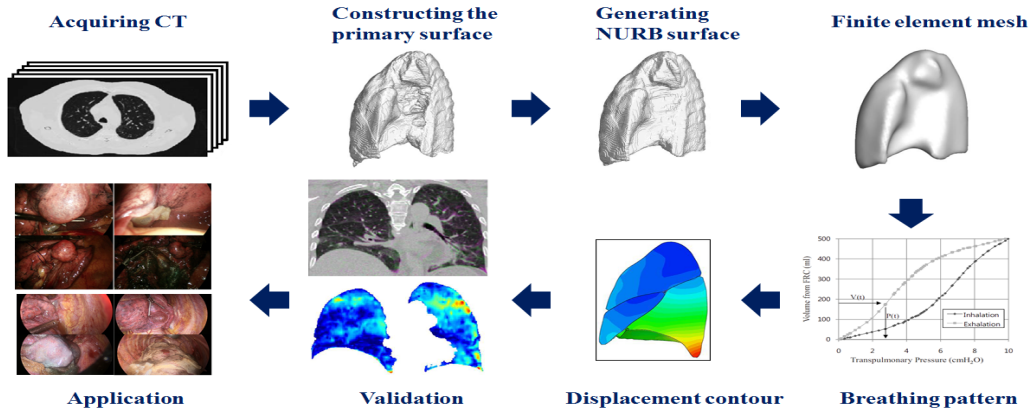


그림 2. 전산생체역학 기반 폐 거동 해석 프로시저.<sup>(1-4)</sup>

보 완료하였고(그림), 이미지 프로세싱 전문 소프트웨어, Mimics를 활용하여 손상 폐의 3D 곡면 및 유한요소 모델을 생성하였고, 이때 기관지, 림프절, 좌·우 폐 등 각종 폐 조직을 정밀하게 구현하였고, 폐, 기관지, 흉막강, 횡경막 등 흉부 골격 구성 요소의 유한요소 모델 구축하였다 (그림 3).

그리고, 폐 손상 환자의 폐 주변 환경하중 분석을 위해 폐에 발생한 유착의 위치, 수 등을 분석하여 Probability Density Function 정의하고, 폐 손상 환자

어려움을 따르고 있다. 이를 위해서는 질환을 겪고 있는 환자의 실질적인 도움이 필수적이다.

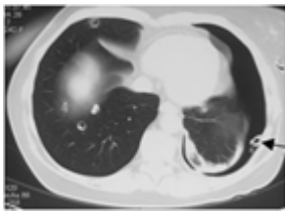
그러나 그 동안의 의료 기록에는 호흡 패턴에 관한 기록이 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 기흉 환자의 동의하에 환자의 호흡 패턴을 얻기 위한 연구를 계획하고 있어, 이후 연구에서는 보다 정밀한 정보를 얻을 수 있을 것으로 기대 된다.

2.2 손상 폐의 3D모델 생성 및 폐 주변 환경하중 분석

확보된 폐 손상 환자의 의료영상파일 (DICOM 파일)을 통해 폐의 3차원 곡면과 유한요소모델을 생성한다 (그림 4). 이때, 이미지 프로세싱 전문 소프트웨어 (Materialise社의 Mimics Innovation Suite 등)를 활용한다. 폐 변형의 정밀 해석을 위해서는 실제 환자의 폐 상태를 있는 그대로 모사하는 것이 매우 중요하다. 이를 위해 좌·우 폐, 기관, 림프절, 갈비뼈, 근육, 인대 등 각종 경/연조직 (Hard/soft tissue)을 CT 혹은

MRI 이미지로부터 추출한다 (그림 4 (A-B) 참고). 의료영상에서 추출할 수 없는 조직은 해부학 정보를 통해 최대한 인체와 유사하게 모델링한다. 이후 이미지 프로세싱 전문 소프트웨어를 사용하여 폐의 NURB Surface (그림 4(C) 참고)를 생성함과 동시에 4면체 요소 (Tetrahedral element) 및 6면체 요소 (Hexahedral element) 기반 유한요소모델 (그림 4(D) 참고)을 생성한다.

일반적으로 폐는 기관지에 걸려있는 형태로서 자중에 의해 아래로 처지는 정적 하중과 횡경막의 움직임



CT 이미지



Mimics를 이용한 정상 폐의 형상 추출



Smoothing을 통한 폐 형상의 정도 변화 검토



유한요소 해석을 위한 메쉬 모델링



흉부 골격 모델링



척추 형상 모델링

그림 3. 손상 폐의 3D 모델 생성

에 따른 동압을 받게 된다. 또한, 폐는 심장과 아주 가까이 위치하고 있어 심장에 의한 동하중이 또한 항상 작용하게 된다. 폐에 발생한 기낭 및 유착 등은 폐의 거동에 경계조건으로 작용하게 되며, 특히, 갈비뼈는 폐의 수축/팽창 거동의 제한 경계로서 작용하므로 정밀한 유한요소해석을 위해서는 꼭 고려해야 한다.

### 2.3 폐 구성조직의 재료모델 개발 및 유한요소모델탑재

폐의 실제 거동 모사를 위해서는 폐의 특성을 역학으로 기술할 수 있는 재료모델의 구축이 반드시 이루어져야 한다. 특히, 폐에 작용하는 하중은 압축-인장의

이러한 폐의 비선형 응력-변형률 관계를 정밀하게 모사하는 수리모델의 개발과 해당 모델의 유한요소해석 코드 탑재가 이루어져야만 폐의 정확한 거동을 시뮬레이션 할 수 있게 된다.

그러나 안타깝게도, 기존의 범용 유한요소해석 코드에서는 폐와 같은 다공성 재료의 비선형 해석을 위한 재료카드 (Material card)를 별도로 제공하고 있지 않고 있으며, 이에 따라 폐 구조의 재료 비선형 거동과 관련된 연구가 활발하게 이루어지고 있지 못한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 폐 전용 초탄성 구성방정식 (Constitutive Equation)을 연속체역학 (Continuum Mechanics)을 바탕으로 개발할 예정이다. 특히, 환자의

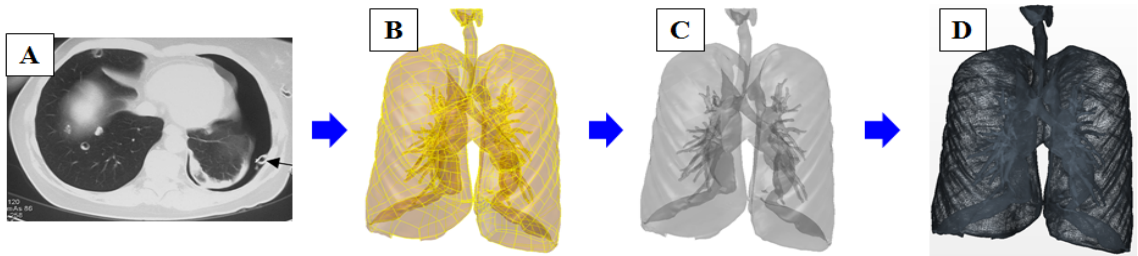


그림 4. (A) 3D CT 이미지, (B) 3D 곡면, (C) NURB Surface, (D) 4면체 요소 기반 유한요소모델.

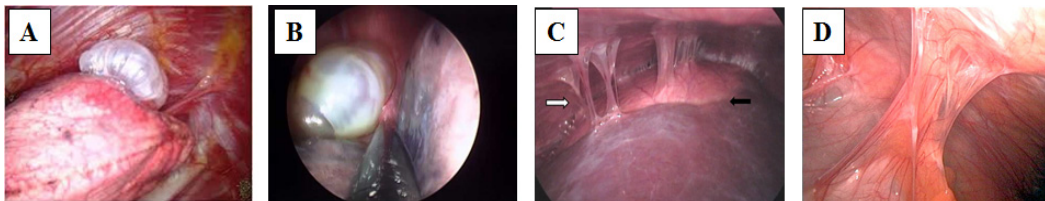


그림 5. (A, B) 폐의 기낭, (C, D) 폐에 발생한 유착.

반복하중이므로 반복하중 하에서 재료 비선형 거동을 잘 모사할 수 있는 수리모델의 개발을 본 연구에서 집중적으로 수행할 예정이다.

폐는 내부에 폐포를 포함하고 있는 대표적인 다공성 재료 (Porous Media)로서 아주 부드러운 두부와 같은 재료이며, 이러한 재료적 특성은 매우 복잡한 재료 비선형 거동을 가져온다. (그림 6 참고)

즉, 폐는 일반적인 재료와 달리 매우 큰 탄성변형이 일어나며, 보통 수백 %의 변형률이 발생한다. 또한, 순수탄성의 속성이 있어 에너지 보존의 성질을 가지며, 하중의 적용 경로와 무관한 거동을 나타낸다. 유사한 거동을 보이는 물질로서는 고무 또는 폼 같은 재료가 여기에 속한다.

나이, 폐 밀도 등을 고려한 파라미터를 도입함으로써 임의의 환자에 대한 정보를 통해 폐의 응력-변형률 거동을 기술할 수 있도록 할 계획이다. [5-6]

나아가 개발 구성방정식을 범용 유한요소해석코드에 손쉽게 탑재 가능한 폐 전용 재료 서브루틴 (ABAQUS User-defined Material Subroutine)을 새롭게 구축할 예정이다 (그림 7 참고).

폐를 제외한 기관, 림프절 등의 재료물성치와 환자 특성 파라미터 (나이, 성별 등)는 문헌상에 보고된 데이터를 적극 활용한다. 필요할 경우, 각종 조직의 다양한 재료 특성을 기술하는 역학모델 (Mechanical Model)을 활용한다.

한편, 폐와 주변조직은 일상생활 동안 매우 복잡한

하중을 받게 되며 이로 인해 재료 내부에 손상이 축적되어 종국에는 파손이나 파단이 발생하게 된다. 이를 규명하기 위해 등장한 학문이 1900년도 초 유럽의 과학자들을 중심으로 제안된 “파괴역학”과 “손상역학”이다.

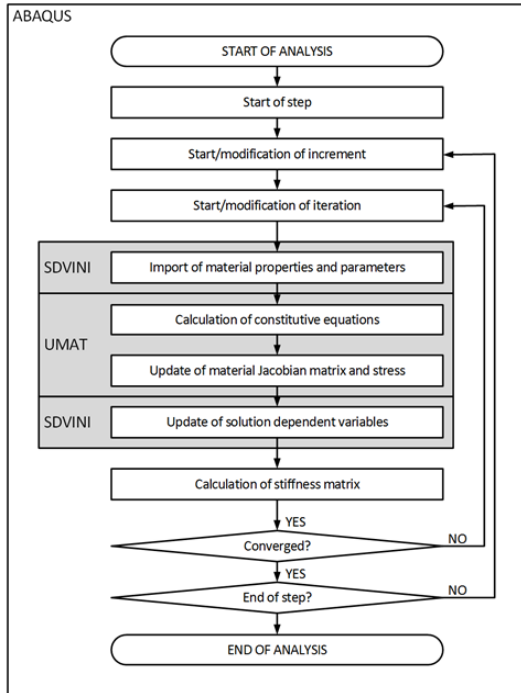


그림 7. ABAQUS 폐 전용 재료 서브루틴 (LUNG\_MAT)의 전산해석 알고리즘(7).

파괴역학은 균열위치나 크기에 따른 균열진전 등을 정밀하게 분석할 수 있는 장점은 보유하고 있으나, 균열선단이 정의될 수 있는 문제에 대해서만 의미를 가지며 균열위치 및 양의 초기설정이 주어지지 않으면 역학적으로 문제를 해결하는 것이 어려운 약점도 동시에 가지고 있다.

반면 손상역학은 임의의 하중에 놓인 구조물이 겪게 되는 재료 내부의 물리적 상태변화를 변형률이력 형태의 내부 상태변수 함수로 표현함으로써, 재료 내부에서 일어나는 결함 및 손상 정도를 정밀하게 계산할 수 있는 학문이며, 기계, 토목, 생체 등 다양한 학문 영역에서 채택되고 있는 학문이다.

그림 8은 재료 미시결합에서부터 구조파손에 이르기까지의 균열의 범위와 이를 다루는 역학의 범주를

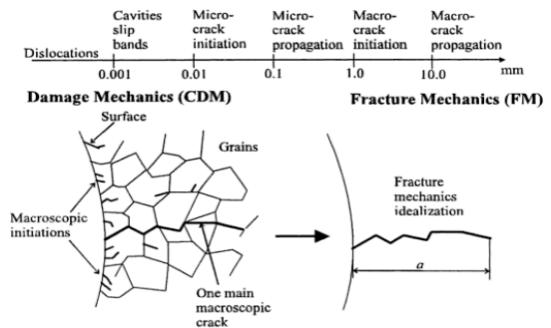


그림 8. 파괴역학과 손상역학의 역학적 범주 비교.

나타내고 있다. 전술한 바와 같이 파괴역학은 거시균열의 발생과 진전의 범주에 대해서만 역학적 해결책을 제시할 수 있는 데 비해, 손상역학은 재료 내부의 미시균열의 발생과 진전을 재료 상태변수의 함수로써 정량적으로 표현할 수 있다. 뿐만 아니라 재료의 거시적인 비선형 거동을 기술하는 비탄성역학 (Inelastic Mechanics)과의 물리적/수리적 결합을 통해 거시균열의 발생과 진전 또한 표현이 가능하다. 따라서 폐와 주변조직에 대한 손상모델이 구축된다면, 폐의 손상진전의 양 및 속도를 정량적으로 표현할 수 있게 된다. 따라서 본 연구에서는 폐에 발생하는 손상을 정량적/정성적으로 규명하기 위해 손상역학을 도입한다.

## 2.4 폐 손상 시뮬레이션 해석 기법 개발 및 검증

폐 질환을 가진 환자의 폐 형상, 환경조건(기압 및 유착 정보), 구성-손상 재료모델 등을 고려한 해석기법 등을 정의한다.

먼저, 폐의 수축과 팽창에 의한 동압력 하에서 유한요소해석을 수행하기 위하여 흡기/호기 호흡 패턴에 따른 폐의 수축/팽창 한계를 정의한다. 정의된 수축/팽창 한계를 유한요소해석에 적용하기 위하여 호흡패턴 Subroutine을 작성하여 폐의 거동을 제어하고, 실제 해석에서는 Mesh Morphing 기법을 이용하여 폐의 거동을 모사한다.

또한, 정밀한 유한요소해석을 위해 폐에 발생한 유착의 위치, 수 등을 면밀하게 분석하여 유한요소 해석의 경계조건으로 적용하고, 유착의 크기 및 정도에 따라 스프링 요소로 모델링하여 폐의 거동을 제어할 예정이다. 한편, 폐를 둘러싸고 있는 갈비뼈는 폐의 팽창/압축에 따른 움직임에 따라 인장력과 압축력을 주기



적으로 받는 구조이므로 3차원 솔리드 요소를 (Solid Element)를 활용하여 갈비뼈를 구현할 예정이며, 심장에 의한 동하중은 환자의 심박신호와 실제 계측된 심장의 운동 범위를 경계조건으로 적용한다.

### 2.5 폐 손상 위치를 고려한 가상 수술 시나리오 선정

폐 손상 가상수술 시뮬레이션을 위한 유한요소모델과 역학모델이 완료되면 비로소 다양한 수술을 고려한 시나리오 시뮬레이션이 수행 가능하다.

환자의 폐질환 사례에 분석을 통해 기낭 및 유착의 크기, 위치, 수 등에 관한 확률밀도함수를 추정한다. 이를 바탕으로 실험계획법을 기반으로 기낭 및 유착에 관한 시나리오를 선정한다.

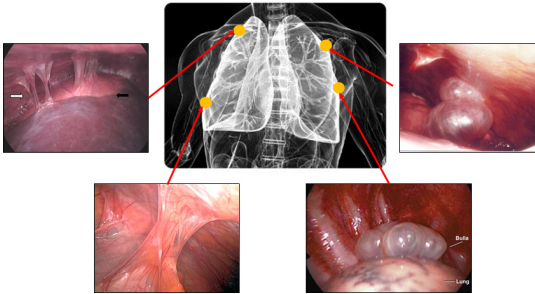


그림 9. 폐 손상 환자의 기낭 및 유착 위치 정보 예.

더불어, 선정된 시나리오는 흉부외과 임상외과의 검토를 거쳐 최종 손상 시나리오로 선정된다. 특히, 나이 및 질환의 정도에 따른 호흡 패턴, 폐 밀도 등의 변수가 적절한지에 대한 검토가 필수적이다. 선정된 시나리오를 바탕으로 파라메트릭 (시리즈) 시뮬레이션을 수행하고, 폐에 발생하는 응력분포, 변형률, 손상 등의 정보를 정량적으로 분석하고, 이를 바탕으로 시뮬레이션 결과 DB를 구축한다.

시리즈 시뮬레이션 결과의 정밀 분석을 통해 기낭의 위치 표적화가 완성되면, 폐의 손상이 최소이면서 최단시간에 최적의 수술이 가능한 가상수술 조건을 탐색한다. 최적 조건 탐색은 별도의 최적화 이론의 적용보다는 흉부외과 임상외과의 Collaboration을 통해 도출하는 것이 매우 효율적이므로, 해당 방법을 채택하도록 한다.

탐색 결과를 통해 복강경 등을 삽입할 수술부의 최적경로를 도출하며, 나아가 최적 수술 경로의 검증을 위해 실제 수술 시간의 단축 여부 및 환자의 합병증

여부를 인덱스 화하여 분석한다.

### 3. 결론

본 연구의 목표는 이차성 기흉 환자의 폐 손상 예측 및 발병 매커니즘 규명을 위한 전산생체역학 모델링 기술 정립 및 이를 기반으로 한 폐 손상부 기낭 표적화 시스템 개발로, 공학적으로 폐 손상부 기낭 표적화에 적용 가능한 기술은 이미 성숙단계에 들어 있는데 비해서, 기존 전산역학 기술을 인체에 적용했던 연구 사례는 많지 않아, 국내 연구에 있어 쉽지 않은 실정이다. 하지만, 현재까지, 폐 외부환경 분석 및 폐 손상 발병 인자 탐색, 폐의 유한요소 모델 구축 등 수행하였고, 이를 바탕으로 폐 손상 시뮬레이션 기법 및 폐 전용 재료 라이브러리 개발, 폐 손상 파라메트릭 시뮬레이션, 폐 손상 발병 매커니즘 규명, 폐 손상부 기낭의 표적화를 단계적으로 시행해 볼 계획이다.

이는 의학적으로 수술 전에 폐의 손상부 파악이 가능하여, 환자의 전신 상태가 좋지 않아 척추마취 또는 국소마취를 통한 수술을 시행해야하는 제한된 시야와 움직임만 허용되는 집도의의 입장에서 술 전 계획 하에 신속한 치료의 가능성을 높일 수 있다는 측면과 공학적으로 전산공학/의공학 분야의 융합기술 확보를 통해 폐 거동 분야 전산생체역학 기술을 확보할 수 있다는 측면에서 그 필요성과 중요성이 있다.

이 뿐 아니라, 폐 거동 시뮬레이션 모델링 기술을 바탕으로 폐 결절의 조직 검사, 폐 암의 절제 범위 결정 등을 안정적, 효율적으로 할 수 있을 것으로 판단되는 바, 향후 흉부 많은 부위에서 응용해 볼 수 있을 것이다.

### 참고 문헌

- (1) Pozin N, et al. A tree-parenchyma coupled model for lung ventilation simulation. *Int J Numer Method Biomed Eng.* 2017;33(11).
- (2) Ehrhardt J, et al. Statistical modeling of 4D respiratory lung motion using diffeomorphic image registration. *IEEE Trans Med Imaging.* 2011;30(2):251-65.
- (3) Werner R, et al. Patient-specific finite element modeling of respiratory lung motion using 4D CT image data. *Med Phys.* 2009;36(5):1500-11.