한국 CAD/CAM 학회 논문집
제 11권 제 4호 2006년 8월 pp. 265-272

학술논문

디지털 이미지를 이용한 위상최적설계

신운주*, 민승재**

Topology Optimization Using Digital Images

Shin, Woon Joo* and Min, Seungjae**

ABSTRACT

For the design and analysis of 3D object featuring complexity and irregularity in shape, sectional digital images measured by an industrial CT scanner are employed to generate a finite element model with uniform voxels. The voxel model plays a key role in developing an integrated reverse engineering system including geometric modeling, simulation and optimization. Design examples applied to topology optimization show that the proposed approach can provide a remarkable reduction in time cost at the conceptual and detail design stages.

Key words : Digital image, Topology optimization, Voxel model, Reverse engineering

1. 서 론

CAD/CAE 시스템에서 복잡한 3차원 기하형상 모델링 및 유한요소 해석모델링에 많은 시간과 노력이 요구된다. 특히 복잡한 기계부품, 문화재, 인체장기, 뼈, 마이크로 단위의 제품 등은 수학적 함수로 표현하기 어려운 복잡성과 불규칙성 때문에 기존의 기하형상 모델 생성 방법으로는 기하형상 정보 표현에 한계가 있다. 또한 잘못된 기하형상 정보로 인하여 유한요소 생성 시 부적당한 가로세로비가 도출되어 해석결과에 신뢰가 떨어지기도 한다.

기하형상이 복잡한 모델에서는 유한요소 해석시간보다 해석모델 생성에 많은 시간이 소요되기 때문에 이와 같은 문제점을 극복하기 위한 방안으로 요소를 생성하지 않는 무요소법[1]과 같은 대체 방법들이 제안되고 있으나 설계자가 만족할 만한 수준에 이르지 못하는 실정이다. 무요소법은 해석하고자 하는 모델을 생성하기 위해 기존에 사용하던 유한요소 대신 유한개의 절점만을 이용하여 모델을 구성하는 방법이다.

*한양대학교 대학원 기계설계학과
**교신저자, 종신회원, 한양대학교 기계공학부, 최적설계신기술 연구센터
- 논문투고일: 2005. 08. 11
- 심사완료일: 2006. 02. 21

또 다른 방안으로 형상의 복잡성과 불규칙성으로 인해 설계자에 의한 기하형상 모델링이 어려운 경우 모델의 형상정보를 디지털화한 이미지로 대체하여 모델링하는 기법들이 제시되고 있다. 디지털 이미지를 이용하면 설계자에 의한 모델링에 소요되는 시간을 단축할 수 있고 반복된 설계 작업 시 모델의 형상정보를 데이터베이스화하여 효율적인 설계가 가능하다.

디지털 이미지를 이용한 기하형상 모델링에 대표적인 방법으로 1983년 발표된 옥트리 표현법[2]이 있다. 옥트리 표현법은 기하형상 모델링에 근간이 되고 있는 기법으로 실제형상을 표현할 수 있는 적당한 크기의 육면체 요소를 정의하고 그 주변에 공유하는 꼭지점과 모서리가 있는 다른 육면체 요소를 생성하여 모델의 기하형상을 표현하는 방법이다. 옥트리 표현법을 좀 더 응용한 마칭큐브법[3]은 기하형상 모델을 실제 형상에 근접하게 생성할 수 있는 방법으로 잘 알려져 있다.

또 다른 방법으로 2002년에 발표된 패턴북을 이용한 패턴코드표현법[4]이 있다. 패턴코드표현법은 옥트리표현법으로 구성된 형상을 일정한 패턴을 갖는 여러 개의 형상으로 데이터화, 즉 패턴북을 생성하여 이와 유사한 형상이 나타났을 경우 모델을 표현하는 방법이다. 패턴코드표현법은 기하형상 모델을 빠르게 생성하는 장점이 있으나 패턴북에서 적당한 형상을

찾는 계산 시간의 복잡성과 대용량의 메모리가 필요하다는 단점이 있다.

디지털 이미지를 이용한 옥트리 표현법을 기하형상 모델을 표현하기 위한 방법 이외에도 직접적으로 유한요소 모델을 표현하기 위한 기법들도 개발되고 있다. 2002년 발표된 이미지기반 모델링법[5]으로 명명된 방법은 유한요소 모델을 효과적으로 생성할 수 있는 절차를 소개하고 있다. 주요 방법은 각 단계를 다섯 단계로 나누어 기하형상 모델을 생성하는 것이다. 산업용 CT스캐너나 광학 현미경과 같은 광학 장비로부터 이미지 데이터를 획득하는 단계로 시작하여 이미지 데이터에 보간을 한 후 설계자가 원하는 영역을 설정하고 영역을 대표하는 이미지 값으로 디지털화 한다. 디지털화 한 이미지 중에 설계 하고자 하는 부분만 재정의하여 구성된 유한요소 모델을 해석모델로 변경하는 단계로 이루어져 있다. 이 방법은 일련의 과정으로 이루어지나 이미지 보간 및 해석모델로의 변경 시에는 자동으로 이루어지지 않기 때문에 외부 환경에 영향을 받게 된다.

이외에도 2003년 발표된 순응적 3차원 메쉬기법[6]이 있다. 이 방법은 옥트리 표현법에서 형상 표현을 위해 구성된 육면체 요소를 구성할 때 각 요소를 공유하는 꼭지점과 모서리를 사용하는데 이 공유하는 꼭지점과 모서리를 좀 더 세분화하여 실제 형상 표현에 좀더 근접할 수 있도록 한 방법이다. 구체적으로 살펴보면 각 육면체 요소에서 공유하는 꼭지점을 기준으로 디지털화한 값을 이용하여 육면체 요소를 생성하고 그 다음 공유하는 모서리를 이용하여 나머지 육면체 요소를 생성한다. 경계부분의 육면체 요소가 위의 두 가지 방법으로 생성되면 형상의 내부를 공유하는 꼭지점과 모서리 정보를 가지고 다시 육면체 요소를 생성하여 유한요소 모델링을 진행한다.

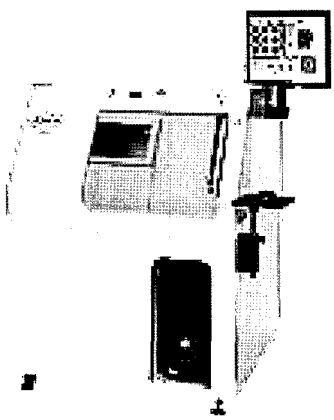


Fig. 1. Industrial CT scanner: SMX-1000

디지털 이미지를 이용하여 생성한 유한요소는 옥트리 표현법을 확장하여 생성한 크기가 일정한 복셀모델로서 바로 구조해석 및 위상최적설계에 활용이 가능하다. 따라서 유한요소 해석모델 생성은 물론 구조최적설계에까지 그 적용범위를 확장하여 디지털 이미지를 기반으로 하는 통합구조설계시스템으로 발전시키고자 한다. 위상최적설계[7]는 구조최적설계문제를 주어진 설계영역 내의 최적재료분포로 변환하여 구조물에서 구멍의 개수 및 크기, 부재간의 연결성 등 최적의 위상정보를 도출하는 설계방법으로 구조물의 초기 개념설계나 상세 보강설계에 활발히 적용되고 있는 기술이다. 기존 구조최적설계에서는 재료의 물성이 고정되었으나, 위상최적설계에서는 설계영역 내에서 재료가 이동하므로 유한요소의 재료물성이 설계변수에 따라 변동한다. 따라서 등가 재료물성값을 계산하기 위하여 복합재역학 이론에 근거한 균질화법을 적용한다.

본 연구에서는 형상의 복잡성과 불규칙성 때문에 일반 CAD시스템으로 모델링하기 어려운 구조물이 설계 및 해석의 대상인 경우, 물체의 단면형상을 측정한 디지털 이미지를 이용하여 해석모델을 효과적으로 생성하는 방법을 제안하고 구조해석을 통한 구조물의 위상최적설계까지 수행하여 통합최적설계시스템의 가능성을 제시한다. 디지털 이미지는 산업용 CT스캐너를 사용하여 생성하였고 구조해석모델로 사용한 복셀모델의 타당성을 검토한 후 보강설계 및 개념설계에 적용한 위상최적설계 예제들을 소개함으로써 통합역공학시스템의 기반을 제시하고자 한다.

2. 디지털 이미지 기반 유한요소 모델링

2.1 디지털 이미지 처리

본 연구에서는 Fig. 1의 산업용 CT 스캐너를 이용하여 제품의 단면형상을 측정하고 디지털 이미지[8]로 저장하였고, 측정한 이미지 데이터에 디지털 이미지 처리 기법[9]을 적용하여 정확한 단면형상을 얻는다.

디지털 이미지 처리기법은 명암값을 가진 이산화된 점을 사용하여 명암도 및 이진법을 이용한 침식과 팽창, 외곽선 검출, 히스토그램 이동과 펼침, 그리고 이진대비 개선처리 등에 적용하는 방법이다.

히스토그램 이동과 펼침 기법은 픽셀당 명암값과 색대조비값을 이용한 처리기법으로 이미지의 밝기를

개선시켜 뚜렷한 형상을 얻을 수 있다. 다음과 같은 사상함수를 통해 픽셀당 명암값과 색대조비값을 조절하여 이미지의 밝기를 결정한다.

$$O(x,y) = (I(x,y) + slide\ value) \times stretch\ value \quad (1)$$

여기서 x, y는 픽셀의 좌표, I는 초기 이미지의 픽셀값, *slide value*는 밝기, *stretch value*는 색대조비, O는 수정된 이미지의 픽셀값을 나타낸다.

이진대비 개선처리 방법은 화면상의 이미지 명암값 분포를 통해 임계값(threshold)을 결정한 후 이 값으로부터 각각의 픽셀 명도값을 결정한다. 각각의 픽셀값은 임계값보다 낮으면 0, 높으면 화면상에 분포된 명암값 중 최대값으로 설정한다. 최대값으로 설정하면 이미지에서 흑백의 차이가 명확해지기 때문에 보다 선명한 형상을 얻을 수 있다.

$$O(x,y) = \begin{cases} 0 & \text{if } I(x,y) < \text{threshold value} \\ \max \text{ value} & \text{if } I(x,y) \geq \text{threshold value} \end{cases} \quad (2)$$

여기서 임계값은 픽셀당 명암값의 합과 이미지의 면적비로 결정하며 전체 이미지에서 형상 정보만을 추출하는데 중요한 역할을 한다.

$$\text{threshold value} = \frac{\text{the sum of each pixel brightness}}{\text{image width} \times \text{image height}} \quad (3)$$

산업용 CT 스캐너로부터 측정한 디지털 이미지를 이미지 처리하는 과정은 Fig. 2와 같다. Fig. 2(a)는 스캐너에서 측정된 원래 이미지를 나타내고 이를 히스토그램 이동과 펼침처리방법을 통해 명암과 색대조비를 조절하여 Fig. 2(b)와 같은 선명한 이미지로 변환하였으며, 이진대비 개선처리를 통해 Fig. 2(c)와 같이 불규칙한 형상에 대한 잡음을 없애고 정확한 모델 형상을 얻을 수 있었다.

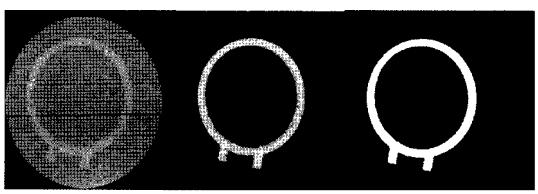


Fig. 2. Procedure of image processing: (a) Original image, (b) Histogram processing, (c) Binary processing

2.2 유한요소 모델 생성

산업용 CT스캐너에서 측정한 디지털 이미지를 아

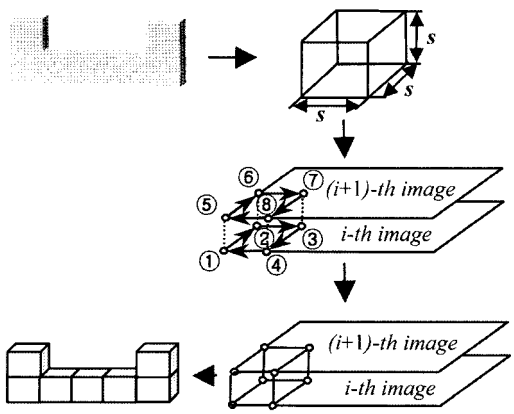


Fig. 3. Procedure of voxel-based finite element modeling

미지 처리를 통하여 개선하고 유한요소 모델을 생성하는 과정은 Fig. 3과 같다. 형상의 단면을 측정한 이미지 중 단면이 나타나는 i번째 이미지와 $i+1$번째 이미지의 픽셀당 명암값 중 최대값을 갖는 픽셀을 가지고 두 이미지들 사이에 육면체 형상이 만들어지는 8개의 픽셀을 찾는다. 4개의 픽셀은 i번째 이미지에서 탐색되고 나머지 4개는 $i+1$번째 이미지에서 탐색된다. 탐색할 때 설계자가 결정한 복셀크기 s에 따라 x 방향과 y 방향으로 동일하게 이동된다. 또한 복셀크기만큼 z 방향으로도 이동되는데 이 때 이동거리는 각 이미지간의 거리를 1로 설정하였기 때문에 복셀크기가 1이면 총 개선된 이미지 중 $i+1$번째 이미지가 사용되지만 복셀크기가 1보다 큰 경우는 그 크기에 맞게 다음 이미지로 이동된다. 이와 같은 방법으로 복셀크기에 따른 8개의 픽셀이 결정되면 결정된 픽셀을 복셀요소의 절점으로 결정하고 i번째 이미지의 4개 픽셀에 대해 시계방향으로 절점번호를 부여한다. 절점번호의 결정시 선행된 탐색으로 절점번호가 부여되어 있다면 결정된 절점은 건너뛰고 절점번호가 없는 픽셀부터 탐색이 이루어진다. 복셀구성을 위한 $i+1$번째 이미지도 이와 같은 방법으로 4개의 픽셀에 절점번호를 부여하고 8개 절점으로 연결성을 표현한 새로운 복셀요소로 등록하므로 요소의 중첩을 방지할 수 있다. 이와 같은 일련의 과정을 통하여 디지털 이미지들로부터 복셀기반 유한요소 해석 모델을 자동으로 생성할 수 있다.

3. 복셀기반 유한요소해석

복셀모델의 타당성을 검증하기 위해 Fig. 4와 같은 원통형 외팔보의 끝단 중앙에 단위하중이 작용하는

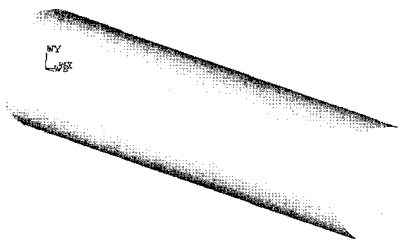
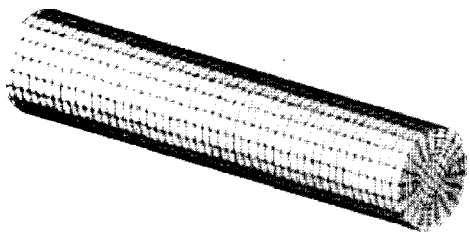
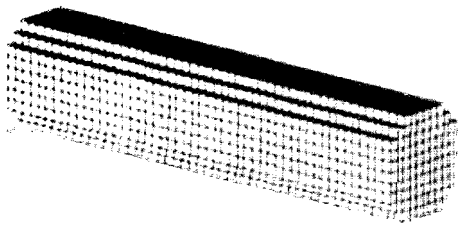


Fig. 4. Circular cantilever beam: length = 10 m, radius = 1 m (E = 200 GPa, ν = 0.3)



(a) Interactive FE model



(b) Automatic voxel model

Fig. 5. Analysis model

정적해석을 수행하여 이론해와 비교하였다[10]. 3차원 유한요소해석을 수행하기 위해서 초기 응력이나 초기 변형률이 없는 등방성 물체로 가정하였고, 해석모델은 Fig. 5(a)와 같이 사용자가 형상의 특성을 고려하여 수작업으로 작성한 유한요소 모델과 Fig. 5(b)와 같이 자동으로 생성할 수 있는 복셀요소를 이용한 유한요소 모델을 사용하였다. 이 때 해석결과 비교의 타당성을 위해 두 모델의 유한요소 개수를 10,800개로 동일하게 모델링하였다.

복셀을 유한요소로 사용하면 크기가 일정하므로 요소강성행렬 계산시 체적 계산에 별도의 수치적분이 불필요하므로 강성행렬 구성이 간편한 장점이 있는 반면에 균일한 요소로 해석모델을 표현하므로 유한요소 수가 많아지는 단점이 있다.

해석결과를 비교하기 위하여 외팔보 끝단에서의 처짐과 중간단면에서의 von Mises 응력을 보이론[11]에 따라 계산하여 이론해로 설정하였다. Table 1은 해석

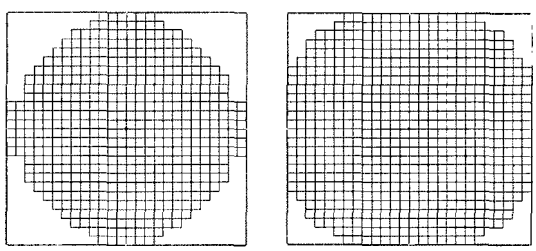
Table 1. Analysis results

	Deflection (m)	von Mises stress (Pa)
Theory	2.122E-9	101.86 (interactive) 82.76 (automatic)
Interactive FE model	2.18E-9 (2.73%)*	105.97 (4.03%)*
Automatic voxel model	2.09E-9 (1.51%)*	78.90 (4.66%)*
*( ) Absolute mean error		

결과를 정리한 표로서 처짐에 대한 유한요소 해석모델과 복셀모델의 해는 이론해와 비교하여 유사한 수준의 오차를 보였다. 보이론에 의한 처짐은 모델의 단면형상과 길이의 함수이고 요소의 형태에 따른 변화에 민감하지 않으므로 일반적인 유한요소 해석모델과 복셀모델의 해석해에는 차이가 크지 않음을 알 수 있다.

반면 응력의 경우 하중에 대한 영향이 가장 적을 것이라 예상되는 길이방향 중심에 있는 요소들의 평균값을 사용하여 비교하였는데 처짐에 비하면 오차가 큰 것을 알 수 있다. 이론해가 두개인 것은 중심에 위치한 유한요소 해석모델과 복셀모델의 위치가 서로 다르기 때문에 각 요소의 중심에서 응력을 계산하여 평균한 결과이다. 응력의 계산은 요소의 위치에 따라 수치 적분하여 구하는 값이므로 요소형상에 영향을 받는 것을 알 수 있다.

복셀모델에서 단면 요소 수에 따른 영향을 고찰해 보기 위해 Fig. 6과 같이 두 가지 경우에 대한 해석을 수행하였다. 요소 수가 적고 많음에 따라 오차가 증가하기 때문에 복셀기반 유한요소 모델을 생성할 시에는 형상에 따른 요소 수의 결정이 중요함을 보여준다.



(a) (b)

Fig. 6. Effect of number of voxel in von Mises stress: (a) 494 elements, 15.8% error, (b) 592 elements, 34.99% error

4. 복셀기반 위상최적설계

4.1 3차원 모델의 위상최적설계

기존 구조물의 최적설계에서는 최적해를 구하는 반복과정에서 설계변수의 변화에 따라서 해석모델이 기하학적으로 수정되어 크기 또는 형상이 변경된 구조물을 설계할 수 있었지만, 경량화에 효과적인 구멍의 개수 및 위치, 부재간의 연결성 등 위상정보를 변경시킬 수는 없었다. 특히 3차원 구조물 설계의 경우 설계자의 경험이나 직관에 의존할 수 없는 복잡성 때문에 최적설계가 더욱 필요하며 위상최적설계는 설계 요구사항을 만족시키면서 경량화 설계가 가능하므로 개념설계단계에서 필수 설계과정으로 자리잡고 있다[1].

위상최적설계에서는 Fig. 7과 같이 3차원 설계영역 Ω는 고정되었다고 가정하고 하중조건과 경계조건이 주어진 상태에서 가장 강성이 큰 구조물을 설계하도록 설계영역 내에 재료를 분포시키는 문제를 해결함으로써 최대강성을 갖는 3차원 구조물을 설계할 수 있다. 이때 3차원 설계영역은 무수히 많은 직육면체의 미세구조로 구성된 다공질체라고 가정하고 미세구조를 정의한 기본구조의 3차원 구멍크기를 변화시켜서 다공질의 정도를 결정한다. 또한 상대적인 구멍크기 뿐만 아니라 직육면체 구멍을 최적방향으로 회전시킴으로써 자유도가 큰 다공질체로 만든다.

만약 3차원상에서 어떤 점 근처가 고체영역이라면 미세구멍을 형성하지 않고, 적당한 다공질이 최적인 경우 미세구멍의 크기는 '0'이나 '1'인 극한 값 대신에 그 중간값을 갖는다. 따라서 설계영역의 임의점에서 미세구조의 다공질성을 결정하는 직육면체의 크기 a, b, c와 회전각 α, β, γ가 설계변수가 된다. 이와 같이 직육면체 공동을 갖는 미세구조로 이루어진 3차원 다공질체의 재료물성값을 계산하기 위하여 복합재역학 이론에 근거한 균질화법을 사용한다. 유한요소로 이산화된 설계영역은 각 요소마다 다른 재료물성값을 갖게 되고 최적화과정을 통해 재료가 분포하는 부분과 사라지는 부분으로 나뉘어서 구조물의 형태를 나타내게 된다.

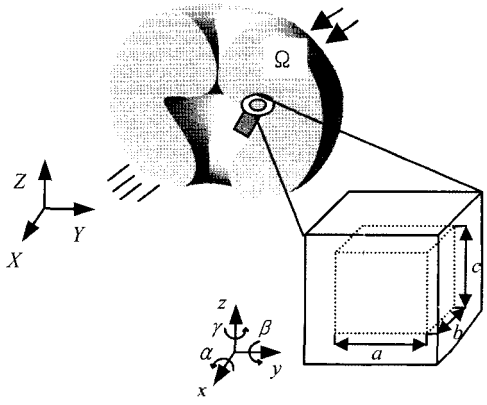


Fig. 7. Macro and micro structures in topology optimization

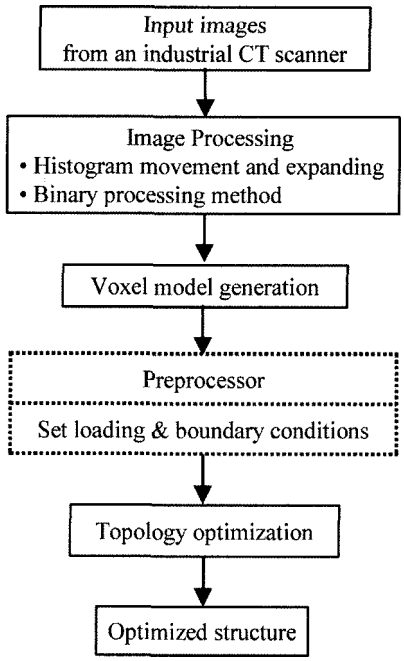


Fig. 8. Procedure of digital image-based topology optimization

이러한 3차원 위상최적설계 방법을 디지털 이미지를 이용한 복셀모델과 연동시키면 기존 구조물의 경량화설계나 보강설계를 단기간에 효과적으로 수행할 수 있다. 복셀기반 위상최적설계 과정은 Fig. 8과 같다. 산업용 CT스캐너로부터 측정된 디지털 이미지를 이미지 처리 과정을 통해 복셀기반 3차원 유한요소 해석모델을 생성하고 상용 전처리 프로그램인 FEMAP의 중립파일[3]로 변경한다. 복셀모델에 하중조건 및 경계조건을 적용한 후 3차원 위상최적설계를 수행하고 경량화 가능부분과 보강부분을 상세설계에 반영한다.

4.2 소프트웨어 개발

본 연구에서 제안된 디지털 이미지 기반 위상최적설계 방법을 구현하기 위하여 Visual C++ 객체지향 프로그래밍을 이용한 소프트웨어를 개발하였으며 Fig. 9와 같이 크게 네 부분으로 구성되어 있다.

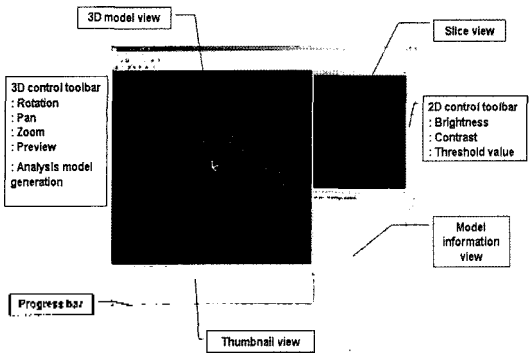


Fig. 9. Main window of the software

- Thumbnail view: CT 스캐너에서 측정한 디지털 이미지 표시
- Slice view: 선택한 단면 이미지에 대한 이미지 처리
- 3D model view: 3차원 해석모델을 생성 후 결과 표시
- Model information view: 각 이미지의 형상 정보와 3차원 해석모델에 대한 정보 표시

5. 설계 적용

5.1 휴대폰 카메라 센서 모듈

휴대폰 카메라 렌즈가 장착되는 센서 모듈에서 하우징 부품의 단면형상을 측정하여 3차원 유한요소 해석모델을 생성하고 위상최적설계를 통하여 구조강성 면에서 보강해야 할 부분을 찾아보는 보강설계를 수행하였다. 하우징은 Fig. 10과 같이 센서 모듈을 휴대폰 카메라에 고정시키는 역할을 하는 부품이다.

산업용 CT스캐너로 촬영한 단층 이미지는 총 242장으로 복셀크기를 1로 설정하였을 때 Fig. 11(a)와 같이 311,003개의 복셀요소가 생성되었으나 형상을 표현하는데 지장이 없으면서 소요되는 해석 시간을

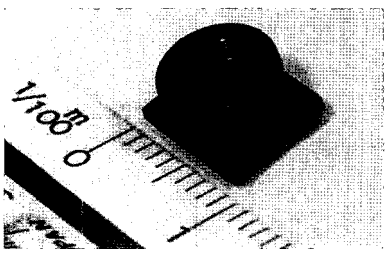
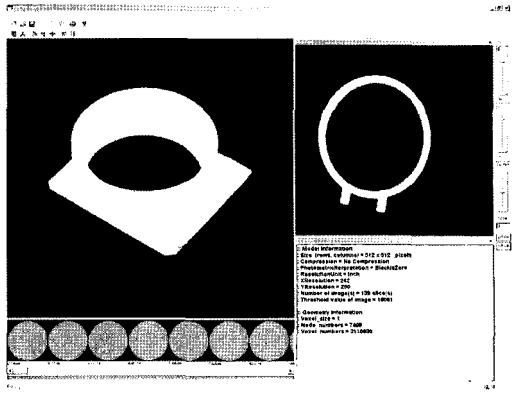
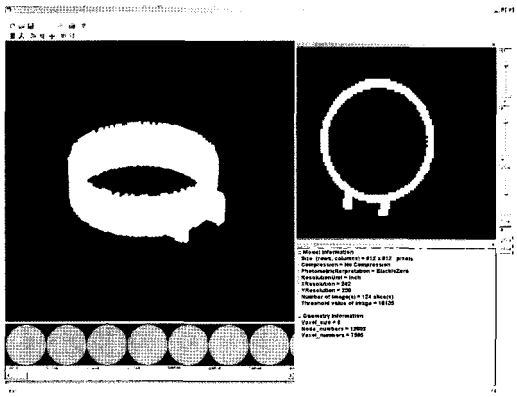


Fig. 10. Housing of the camera sensor module in a mobile phone



(a) voxel size = 1 (311,003 voxels)

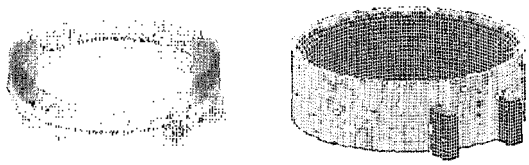


(b) voxel size = 5 (15,051 voxels)

Fig. 11. Voxel model of the housing

단축하고자 복셀크기를 5로 증가시켜 15,051개의 복셀요소로 유한요소 해석모델을 생성하였다. 이때 사용된 이미지는 총 114장이고 Fig. 11(b)와 같다.

구조해석을 위하여 Fig. 12(a)와 같이 센서모듈 바닥을 고정하였고 상단에 분포하중이 작용하는 조건을 적용하였으며, 재료는 플라스틱($E = 74$ GPa, $\nu = 0.22$)을 가정하였다. 위상최적설계를 위한 재료제한조건은 전체 설계영역의 70%에 해당하는 재료를 사용하도록 설정하였고, 그 결과 Fig. 12(b)와 같이 하우징 외부를 우선적으로 보강해야 되는 사실을 알 수 있었다.



(a) design domain (b) result

Fig. 12. Topology optimization of the housing

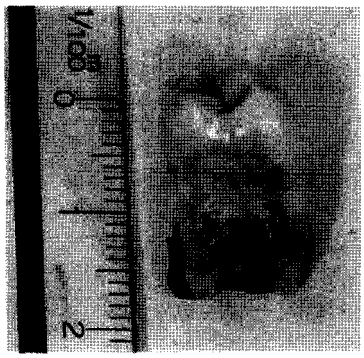
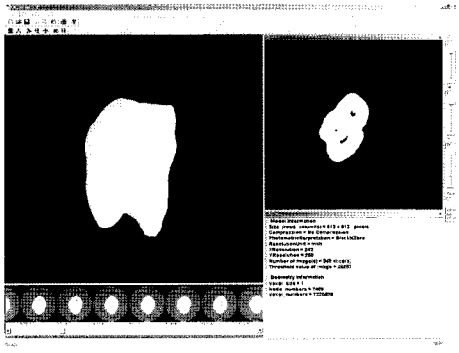
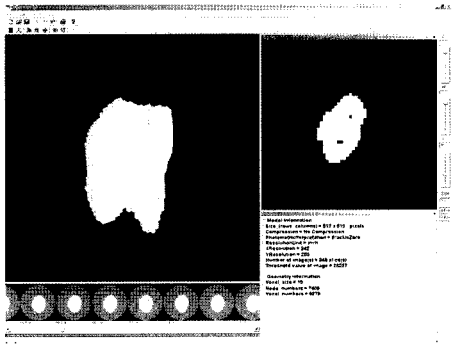


Fig. 13. Human teeth



(a) voxel size = 1 (7,226,598 voxels)

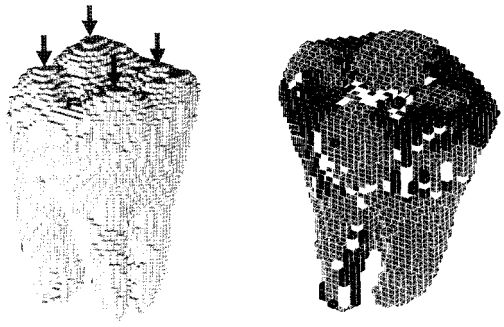


(b) voxel size = 8 (11,642 voxels)

Fig. 14. Voxel model of the teeth

5.2 치아

의료분야 적용예제로 Fig. 13과 같은 사람의 어금니를 모델링하고 위상최적설계를 수행하여 치아 강성을 고려한 의치의 초기 개념설계로 활용 가능성을 살펴보았다. 산업용 CT스캐너에서 촬영한 이미지는 총 348장으로 이를 모두 사용하면 Fig. 14(a)와 같이 7백여 만개의 복셀로 구성된 해석모델이 생성되므로 복셀크기를 8로 조절하여 Fig. 14(b)와 같이 11,642개의 복셀로 구성된 해석모델을 생성하였다. 이와 같이 복셀크기에 따라서 요구되는 해상도로 해석모델을 자유롭게 변경할 수 있다.



(a) design domain (b) result

Fig. 15. Topology optimization of the teeth

윗니와 아랫니가 닿는 부분을 고려하여 Fig. 15(a)와 같이 단위하중을 적용하였고 치아하단을 고정하였으며, 재료는 치아(E = 25 GPa, ν = 0.3)로 설정하였다. 실제 어금니의 해석모델을 설계영역으로 설정하고 설계영역의 80%에 해당하는 재료만으로 의치를 제작한다고 가정하고 그 형태를 위상최적설계를 수행하여 찾아본 결과 Fig. 15(b)와 같다. 하중전달 경로를 따라서 재료가 우선적으로 분포됨을 알 수 있고 재료량을 변화시키면서 다양한 설계안을 도출할 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 복잡한 형상의 모델을 산업용 CT스캐너에서 촬영하여 디지털 이미지로 처리한 후 복셀기반 해석모델을 구성하였다. 또한 복셀기반 유한요소해석의 타당성을 검증하고 위상최적설계에 적용하여 기존 구조물의 설계변경을 단기간에 효과적으로 수행할 수 있는 방법을 제시하였다. 제안된 방법을 정보통신분야의 미세구조 및 바이오분야의 치아의 구조설계에 적용함으로써 디지털 이미지를 이용한 통합역공학시스템으로 발전 가능성을 확인하였다.

향후 구조해석 및 위상최적설계에 필요한 경계조건 및 하중조건의 적용 및 후처리 과정을 통합시스템 내에서 구현하는 방안을 모색해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R08-2003-000-10514-0) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Krysl, P. and Belytschko, T., "Element-free Galerkin method: Convergence of the Continuous and Discontinuous Basis Functions", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 148, pp. 257-278, 1997.
2. Yau, M. M. and Srihari, S. N., "A Hierarchical Data Structure for Multidimensional Digital Images", *Journal of Communication ACM*, Vol. 26, No. 7, pp. 504-515, 1983.
3. Lorensen, W. E. and Cline, H. E., "Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm", *Journal of Computer Graphics*, Vol. 21, No. 4, pp. 163-169, 1987.
4. Kim, C. S. and Lee, S. U., "Compact Encoding of 3D Voxel Surfaces Based on Pattern Code Representation", *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 11, No. 8, pp. 932-943, 2002.
5. Terada, K., Kyoya T., Kazama, M., Lee, K. and Oyang, L., "Image Based Modeling and Analysis of Microstructures for Two Scale Problems in Geomechanics", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 26, pp. 273-297, 2002.
6. Zhang Y., Bajaj, C. and Sohn, B. S., "Adative and Quality 3D Meshing from Imaging Data", *Proceedings of Communication ACM*, pp. 286-291, 2003.
7. Bendsøe, M. P. and Kikuchi, N., "Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 71, pp. 197-224, 1988.
8. Adobe Developers Association, TIFF Version 6.0 Final, 1992.
9. Baxes, G. A., "Digital Image Processing: Principles and Applications", Wiley, New York, pp. 337-341, 1994.
10. Guldberg, R. E., Hollister, S. J. and Charras, G. T., "The Accuracy of Digital Finite Element Models", *Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 120, pp. 289-295, 1998.
11. Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N., Theory of Elasticity, 3rd Edition, McGraw-Hill, pp. 41-46, 1970.
12. 송영준, 민승재, 菊池昇, 유한요소법과 최적구조설계 CAE, 성안당, pp. 299-317, 1999.
13. SDRC, The Translator Reference Section in the FEMAP Users Guide, FEMAP v7.0, 1999.

신 운 주

2004년 강원대학교 기계공학과 학사
2006년 한양대학교 기계설계학과 석사
2006년~현재 ARmax 기술연구소 연구원
관심분야: Reverse Engineering, Digital image Technology, CT scanning, Application programming

민 승 재

1989년 서울대학교 기계공학과 학사
1991년 서울대학교 기계설계학과 석사
1997년 University of Michigan, Ann Arbor Ph.D.
1997년~1999년 University of Tokyo, Research Associate
1999년~현재 한양대학교 기계공학부 교수
관심분야: Structural Optimization, CAD/CAD/CAE, Simulation Based Design using Digital Images