

# 토폴로지 이미지를 이용한 CAD 모델 구축

이 동 훈\*, 민 승 재†

(2003년 4월 7일 접수, 2003년 9월 30일 심사완료)

## CAD Model Construction Using Topology Image

Donghoon Lee and Seungjae Min

**Key Words :** CAD Model(CAD 모델), Topology Image(디지털 이미지), Topology Optimization(위상 최적설계), Morphology(모폴로지)

### Abstract

Topology optimization is widely accepted as a conceptual design tool for the product design. Since the resulted layout of the topology optimization is a kind of digital images represented by the density distribution, the seamless process is required to transform digital images to the CAD model for the practical use. In this paper, the general process to construct a CAD model is developed to apply for topology images based on elements. The node density and the morphology technique are adopted to extract boundary contour of the shape and remove the noise of images through erosion and dilation operation. The proposed method automatically generates point data sets of the geometric model. The process is integrated with Pro/Engineer, so that the engineer in practice can directly handle with curves or surfaces form digital images.

### 1. 서 론

기존 제품설계과정을 살펴보면 CAD 모델링을 통하여 제품의 기하형상을 생성하고 구조강도 등 각종 설계요구사항을 만족하는지 여부를 CAE 해석 또는 제품모형을 제작하여 실험하는 방법 등으로 검토하고 부적합할 경우 다시 형상모델을 수정하는 반복과정을 수행하게 된다. 이러한 설계자의 경험에 크게 의존하는 반복과정은 최적설계방법을 도입함으로써 효과적으로 줄일 수 있다.

현재 범용 CAD 소프트웨어(CATIA, Pro/Engineer, I-DEAS 등)에서는 자동 요소망 생성기능과 간단한 CAE 해석 기능을 추가하여 설계자가 CAD 모델을 생성한 후 직접 성능평가를 할 수 있도록 모듈을 제공하고 있으며, 초보적인 최적설계알고리즘도 탑재하고 있다. 그러나 성능평가 이후 CAD 모델 수정은 여전히 설계자의 수작업으로 이루어지고

있으며, 최적설계의 경우도 단순한 설계 파라미터의 자동변경에 국한된 수준이다. 특히 토폴로지 최적설계(Topology Optimization)<sup>(1)</sup>의 경우에는 초기 모델의 크기나 형상 뿐만 아니라 구조물이 갖고 있는 위상까지도 변하기 때문에 설계자가 그 결과를 해석하여 다시 모델링한다.

Bendsøe 와 Kikuchi<sup>(2)</sup>에 의해 제안된 균질화법을 이용한 토폴로지 최적설계의 경우에는 최적구조설계문제를 최적재료분포문제로 변환하여 해석하였기 때문에 최적설계 결과가 각 유한요소의 밀도분포로 나오게 된다. Fig. 1 은 균질화설계법을 이용하여 지지구조물의 토폴로지 최적설계를 한 예로 각 유한요소들이 0 에서 1 의 값을 갖는 디지털 이미지로 표현되기 때문에 형상을 추출하여 CAD 모델을 구축하는데 어려움이 있다.

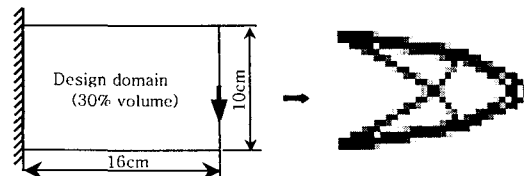


Fig. 1 Topology optimization

\* LG 전자 디지털 어플라이언스연구소

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부  
E-mail: seungjae@hanyang.ac.kr  
TEL: (02)2290-0457 FAX: (02)2298-4634

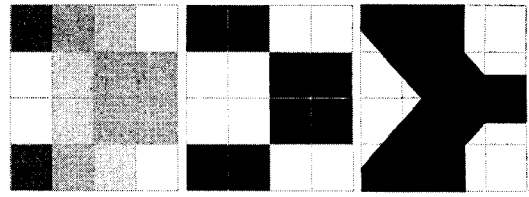
Kumar 와 Gossard<sup>(3)</sup>는 토폴로지 이미지에서 형상을 추출하기 위해서 형상밀도함수(shape density function)를 정의하였으며, Lin 과 Chao<sup>(4)</sup>는 이미지 해석을 통하여 형상의 특성을 찾아내어 미리 정의된 원, 다각형이나 그들의 조합으로 이루어진 도형으로 형상을 단순화하였다. 그러나 모든 형상을 일정하게 정의된 도형으로 정의하기 때문에 실제 형상과 많은 차이가 있으며 복잡한 형상은 표현할 수 없었다. Hsu 등<sup>(5)</sup>은 등밀도선을 이용하여 형상을 추출해 내었는데 이런 경우에는 매끄러운 형상이 나오지 않기 때문에 주요한 점을 추출해 낸 후 다시 형상최적화 과정을 거쳐서 최종형상을 추출하였다. 토폴로지 이미지로부터 형상을 추출하는데 또 하나의 어려운 점은 설계자가 의도하지 않은 형상이 나오는 경우를 고려해야 한다는 점이다. 예를 들면, 바둑판 무늬의 형상(Checkerboard Pattern)이 토폴로지 이미지에서 종종 발생하고 실제 구조물과 연결되지 않고 떨어져 있는 곳에 재료가 분포하는 불연속적인 형상이 나올 수도 있다. Youn 과 Park<sup>(6)</sup>은 토폴로지 최적설계시 밀도 재분배 알고리즘을 적용하여 바둑판 무늬가 발생하는 것을 억제하였으며 유용하지 않은 형상이 나오는 것은 방지할 수 있었으나 레이아웃을 형성하는 경계선을 추출해 내는 연구까지는 진행되지 않았다.

본 연구의 목적은 토폴로지 이미지와 같은 디지털 이미지에서 레이아웃을 형성하는 경계선을 추출해 내고 주로 그래픽 이미지에서 사용되었던 모폴로지(Morphology)<sup>(7)</sup> 기법을 토폴로지 이미지에도 적용하여 바둑판 무늬나 불필요한 잡음을 제거하고 좀더 부드러운 외형선으로 만들어 준 후 CAD 모델로 생성하는 것으로 모든 과정은 자동으로 이루어지도록 구현하였다.

## 2. 외형선의 추출

### 2.1 절점의 밀도

토폴로지 이미지는 그 결과가 부피를 갖는 요소에 밀도값이 부여되어 있으므로 요소의 밀도를 이용할 경우 정확한 형상을 추출하는데 어려움이 있다. 특히 요소의 크기가 설계영역에 비하여 상대적으로 크다면 이진화 과정을 거쳐 형상을 추출할 경우 임계값을 구하기 어려울 뿐 아니라 임계값을 구해서 이진 이미지로 바꾸었다고 해도 경계선이 매끄럽게 나오지 않고 Fig. 2(b)와 같이 연속된 구조물이 아니고 끊어진 형상이 나온다. 요소



(a)Gray image (b)Element binary (c)Node binary

Fig. 2 Topology image conversion

의 크기가 작은 경우에도 매끄럽지 않은 형상이나 끊어진 형상이 나올 수 있고 바둑판 무늬형상도 빈번하게 나오기 때문에 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Fig. 2(c)와 같이 절점 밀도 개념을 도입하여 이진화된 이미지를 만들고 형상을 추출한다. 절점 밀도는 절점을 포함하고 있는 요소들의 평균 밀도값으로서 식 (1)과 같이 계산된다.

$$\rho_{node} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \rho_{ele}^i \quad (1)$$

여기서,  $N$ 과  $i$ 는 각각 절점을 포함하고 있는 요소의 수와 요소를 나타낸다. 따라서 모서리에 위치하고 있는 절점은 요소의 밀도가 절점의 밀도가 되고, 한 절점을 포함하고 있는 요소가 여러 개 있으면 그 요소들의 평균 밀도값이 그 절점의 밀도값이 된다.

### 2.2 절점의 이진화

토폴로지 이미지의 외형선 추출은 위에서 구한 절점 밀도를 이진화해서 이루어진다.

토폴로지 최적설계는 최적구조설계문제를 최적재료분포문제로 전환하여 레이아웃을 생성하는데, 구조물을 구성하는 부분의 부피를 지정하여 이것보다 분포되는 재료의 부피가 적어야 한다는 식 (2)와 같은 구속조건을 갖는다.

$$g = \int_{\Omega} \rho d\Omega \leq \Omega_s \quad (2)$$

여기서,  $\Omega_s$ 는 설계자가 지정한 부피를 말한다. 형상을 추출하기 위하여 토폴로지 최적설계에서 구속조건으로 사용했던  $\Omega_s$ 를 이용하여 임계 밀도값(threshold value)을 구하고 그 값을 기준으로 절점의 밀도값을 이진화한다. 임계 밀도값을 구하기 위한 과정으로 먼저  $\Omega_s$ 에 해당하는  $V_{Constraint}$ 를 구하면 식 (4)와 같다.

$$V_{Total} = \sum_{i=1}^N V_{ele}^i \quad (3)$$

$$V_{Constraint} = V_{Total} \times C \quad (4)$$

여기서,  $V_{ele}^i$  는 각 요소의 부피,  $C$  는 재료의 사용 비율을 나타낸다. 설계영역의 전체 부피는 각 요소의 부피를 모두 합하여 구하고 구속조건으로 사용된 부피는 전체 부피에서 재료사용 비율을 계산하여 구한다. 또한 토폴로지 최적설계를 수행할 때 구속 조건으로 30%의 재료를 사용한다면  $C$  값은 0.3 이 된다.

임계밀도값  $\rho_{th}$  를 찾기 위해 초기값  $\rho_{th}$  를 0.5 로 정하고 그 값에 해당하는 부피인  $V_{th}$  값을 구한다. 각 요소를 이루고 있는 절점의 밀도값을  $\rho_{th}$  보다 크면 1 로,  $\rho_{th}$  보다 작으면 0 으로 이진화하면 모든 요소들은 Fig. 3 과 같이 6 가지로 분류되는데 각 요소에 해당되는 부피비율(Rate)을 계산하여 식(5) 와 같이  $V_{th}$  를 구한다.

$$V_{th} = \sum_{i=1}^N (Rate \times V_{ele}^i) \quad (5)$$

Fig. 3 에서 (a)의 경우에는 요소에 포함된 모든 절점이 0 이므로 그 요소는 비어있는 요소가 되어 부피비율(Rate)의 값은 0 이 되고 반대로 모든 절점이 1 인 (f)의 경우에는 부피비율이 1 이 된다. (b)와 같이 0 인 절점과 1 인 절점을 공유하고 있는 요소의 부피는 0 과 1 을 포함하고 있는 변의 중점을 연결하여 1 인 절점을 포함하고 있는 영역의 부피를 계산하면 전체 요소부피의 1/8 에 해당하므로 부피비율은 0.125 의 값을 갖는다. 모든 요소는 Fig. 3 에 있는 6 가지 중 한가지 경우에 속하게 되므로 부피비율값을 이용하여 각 요소의 부피를 구해 더해 줌으로써  $\rho_{th}$  에 해당하는  $V_{th}$  를 구할 수 있다.

$\rho_{th}$  에 해당하는  $V_{th}$  를 구한 후  $V_{Constraint}$  와 비교하여 만약  $V_{th}$  보다  $V_{Constraint}$  가 크면  $\rho_{th}$  값을

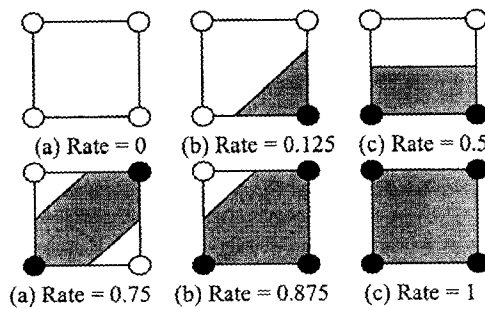


Fig. 3 Classification of element volume rate

줄이고  $V_{th}$  보다  $V_{Constraint}$  가 작으면  $\rho_{th}$  값을 늘리면서  $V_{th}$  와  $V_{Constraint}$  값이 같아지는  $\rho_{th}$  값을 찾게 된다. 최종적으로  $\rho_{th}$  값을 구하면 그 값을 임계 밀도값으로 정하여 절점을 이진화하게 되고 이진화된 절점을 이용하여 토폴로지 이미지의 외형을 표현한다. 한 요소와 인접해 있는 요소들은 2 개의 절점을 공유하고 있기 때문에 0 과 1 사이의 중간 점을 연결한 선은 끊어지지 않고 하나의 폐곡선을 이루어 Fig. 1 의 토폴로지 이미지에서 Fig. 4 와 같이 형상을 정의할 수 있다. 또한 요소의 평균 밀도값인 절점의 밀도를 사용함으로써 요소를 이진화할 경우 나타날 수 있는 바둑판무늬도 Fig. 4 와 같이 자동적으로 제거된다.

### 3. 모폴로지

#### 3.1 모폴로지 기법

모폴로지(Morphology)란 경계, 골격, 블록과 같은 영역의 형태를 표현하는데 있어서 유용한 영상 요소들을 추출하기 위한 방법으로 수학적으로는 형태론의 개념으로 사용된다. 모폴로지 기법으로는 침식(Erosion) 연산, 팽창(Dilation) 연산과 침식과 팽창연산의 조합으로 이루어지는 열림(Opening) 연산과 닫힘(Closing) 연산이 있다.

침식연산은 물체의 크기를 일정하게 줄여주는 작용으로 주로 물체와 배경 사이의 스파크 잡음을 제거하거나 전체 영상에서 잡음으로 분류될 수 있는 작은 물체를 제거해 주는 역할을 해 준다. 팽창연산은 침식연산과 반대로 물체의 크기를 일정하게 확장해 주는 작용을 하며 물체 안에 있는 작

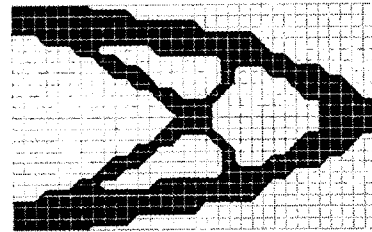


Fig. 4 Layout using node binary



Fig. 5 Morphology

은 공간을 채워주는 역할을 한다. Fig. 5 는 원래 점선으로 이루어진 영상을 침식한 결과와 팽창된 결과를 보여준다.

열림연산은 침식연산을 한 후 다시 팽창연산을 하는 것으로 물체를 이루는 형상에는 변화 없고 다만 잡음을 제거해 주는 결과를 나타내며, 닫힘연산은 팽창연산을 한 후 다시 침식연산을 하는 것으로 마찬가지로 물체를 이루는 형상에는 변화가 없지만 물체 안에 생성되어 있는 작은 구멍을 채워주는 효과가 있다.

모폴로지 기법은 침식연산과 팽창연산을 기본 연산으로 하여 이것을 응용한 열림연산과 닫힘연산 이외에도 외곽선을 검출하거나 물체의 골격을 뽑아내는 등 다양하게 사용된다.

3.2 토폴로지 이미지에서의 모폴로지 기법

모든 요소는 4 개의 절점을 포함하고 있는데 그 4 개의 절점이 모두 0 이면 비어있는 요소이고 모두 1 이면 구조물의 내부에 위치해 있는 요소이다. 그 외에 0 과 1 인 절점을 모두 포함하고 있는 요소는 구조물의 경계를 형성하고 있는 요소이므로 그 요소들만 추출해내서 침식과 팽창연산을 해주게 된다. 토폴로지 이미지는 이진화를 통해서 Fig. 3 과 같이 6 가지 종류의 요소들로 구분되고, 이 6 가지의 요소들 중 Fig. 3(b)-(e) 요소들은 구조물의 외형을 형성하고 있는 요소이므로 이러한 요소들을 조작함으로써 모폴로지의 침식과 팽창연산을 구현하였다.

침식연산은 구조물의 외형을 형성하고 있는 요소들을 탐색한 후 그 요소가 포함하고 있는 절점 중에 1 의 값을 갖는 절점을 0 으로 바꾸어 주면 Fig. 6 과 같이 침식된 이미지를 만들 수 있다. Fig.

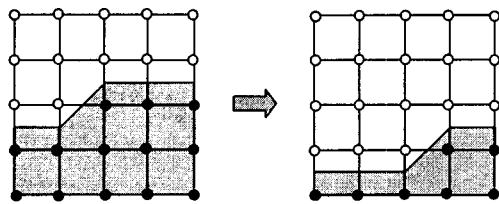


Fig. 6 Erosion of topology image

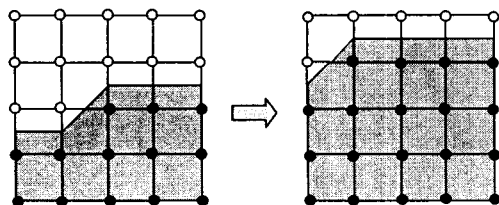


Fig. 7 Dilation of topology image

6 을 보면 경계를 이루는 요소의 절점들 중에 1 인 절점은 모두 0 으로 바뀌면서 침식된 이미지가 생성되었다. 한편 팽창연산은 침식연산과는 반대로 경계를 이루는 요소의 절점들 중에 0 인 절점을 1 로 바꾸어 줌으로써 Fig. 7 과 같은 팽창된 이미지를 만들 수 있다.

토폴로지 이미지의 침식과 팽창연산으로 잡음을 제거하고 불필요한 공간을 채울 수 있는데 이런 경우에도 구조물의 전체적인 크기에 변화가 생기므로 열림과 닫힘연산을 실행함으로써 외형에는 변화를 주지 않는다.

4. CAD 모델 구축

4.1 점 데이터의 연결

디지털 이미지를 CAD 모델로 생성하기 위하여 이진화된 이미지에서 외형을 추출해 낸 후에 외형선을 이루는 점들을 연결하여 폐곡선으로 표현하는 작업이 필요하다. 그래픽 이미지의 경우에는 추출된 최외각 픽셀들의 좌표가 외형선을 이루는 점들이 되고 토폴로지 이미지의 경우에는 최외각을 이루는 요소를 나눈 점들이 외형선을 이루는 점들이 되므로 이들을 하나의 폐곡선으로 연결해 줌으로써 CAD 모델을 생성할 수 있다. 경계를 이루는 요소의 변들이 0 과 1 인 절점으로 인하여 일정 비율로 나누어지고 이때 나누어진 점이 구조물을 형성하는 점 데이터로 저장된다.

Fig. 8 은 토폴로지 이미지의 점 데이터를 연결하여 형상을 표현한 예인데 점 데이터를 연결하여 외형선을 만들 경우 매끄럽지 않고 지그재그한 형상이 나오는 경우가 종종 있는데 이러한 현상을 방지하기 위해 다음 두가지 알고리즘을 추가하였다.

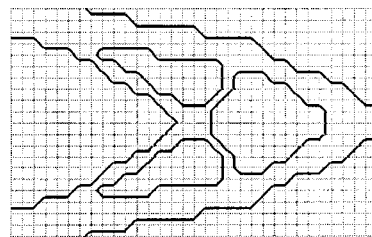


Fig. 8 Point connection of a topology image

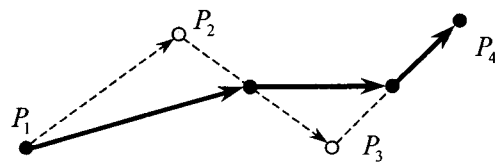


Fig. 9 Zigzag relaxed algorithm

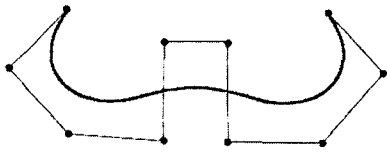


Fig. 10 B-spline curve

첫번째는 지그재그한 현상을 완화시키기 위하여 제안된 알고리즘으로 각 점들을 연결하는 선들의 방향성을 판단하여 시계방향(-)과 반시계방향(+)이 교대로 나오면 지그재그 현상이 나타난 것으로 인식하고 Fig. 9 와 같이 점  $P_1$  과  $P_2$ , 점  $P_2$  와  $P_3$  의 중간점을 연결해 줌으로써 지그재그한 현상을 완화시킬 수 있다

위 첫번째 알고리즘으로 지그재그한 현상을 완화시켰지만 완전히 제거되지 않는기 때문에 본 연구에서는 식 (6)과 (7)로 정의되는 B-spline 곡선을 이용하여 부드러운 곡선을 형성하는 점 데이터를 추출해 내었다.

$$C(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u)P_i \quad a \leq u \leq b \quad (6)$$

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0 & \text{그 외의 범위} \end{cases} \quad (7)$$

$$N_{i,p}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u)$$

여기서  $N_{i,p}$  는 B-spline 의 블렌딩함수이다. 식 (6) 에서  $p$  는 곡선의 차수인데 5 차 곡선을 이용하였고,  $P_i$  는 B-spline 곡선의 조정점(control point)으로 앞에서 추출된 점 데이터들을 조정점으로 사용하여 부드러운 곡선을 생성하고 그 곡선 위의 점들을 다시 추출하였다. Fig. 10 은 B-spline 곡선을 이용하여 조정점을 연결한 선보다 부드러운 곡선으로 다시 표현될 수 있음을 나타내고 있다.

#### 4.2 CAD 모델 생성

위에서 추출된 점 데이터는 상용 CAD 프로그램인 Pro/Engineer 의 입력파일(\*.ibf)로 활용된다. Pro/Engineer 에서 이 파일을 읽어 들여 각 점들을 연결하는 2 차원 스플라인 곡선을 생성한다. 모든 곡선은 폐곡선을 이루어야 하기 때문에 시작점과 끝점은 같아야 한다. 2 차원 이미지의 경우는 입력 파일이 하나의 단면으로 구성되어 있어 각 점을 스플라인 곡선으로 연결해 줌으로써 모델을 생성하였으나 3 차원 이미지는 여러 단면으로 구성되어 있기 때문에 각 단면마다 형성된 2 차원 곡선

을 연결하여 3 차원 모델로 만들어야 한다. 각 단면의 2 차원 곡선을 연결하여 서피스(surface)를 가진 3 차원 모델을 만들기 위해 Pro/Engineer 에서 제공하는 블렌드 함수(Blend function)의 기능을 이용하였다. 블렌드 함수는 2 차원의 단면을 연결하여 3 차원 모델을 만드는데 각 단면이 부드럽게 연결되도록 스플라인 곡면으로 각 단면을 연결하여 모델링한다.

Pro/Engineer 에서 점 데이터 파일을 이용하여 CAD 모델을 생성하는 과정은 trail 파일이라는 텍스트 파일 형식의 스크립트 파일을 이용하였다. trail 파일은 Pro/Engineer 에서 모델링 이력을 저장하는 파일로 여기에 2 차원 곡선과 3 차원 곡면을 생성하는 과정을 미리 저장함으로써 Pro/Engineer 에서 CAD 모델의 자동생성을 구현할 수 있다.

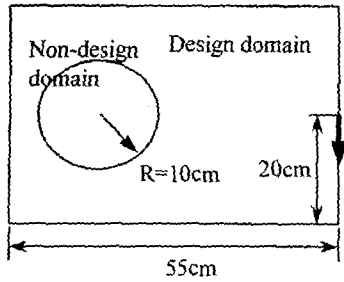
모든 과정은 자동으로 이루어지도록 하였으며 만약 설계자의 의도대로 형상이 나오지 않을 경우에는 새로운 임계값을 입력하거나 침식과 팽창연산을 여러 번 수행함으로써 원하는 형상이 나올 수 있도록 프로그램을 설계하였다.

## 5. 예 제

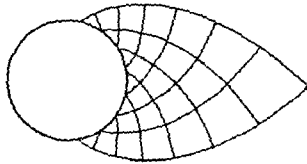
### 5.1 Michell Truss

Michell 은 Fig. 11(a)와 같은 설계영역에서 가장 효율적인 재료분포를 갖는 형상을 찾기 위해 트러스 구조로 가정하여 해석적인 방법으로 Fig. 11(b)와 같은 최적 형상을 구하였고, 이를 미셸 트러스(Michell truss)<sup>(8)</sup>라고 부른다. 미셸 트러스는 해석적으로 풀 해이므로 토폴로지 최적설계의 결과를 검증할 때 많이 사용되는 예제이다. 초기 설계 영역의 크기는 55cm×40cm 의 직사각형으로 설정하고 원형인 부분은 비설계영역으로 설계 시 재료분포가 고려되지 않는 부분이다. 유한요소는 110 × 80 개의 4 절점요소로 나누고, 재료의 사용량은 설계영역의 13%로 설정하고 토폴로지 최적설계를 수행하였다.

미셸 트러스의 토폴로지 해석 결과는 Fig. 12 와 같이 비설계영역인 원형부분과 연결되는 부분에 작은 공간이 생기면서 바둑판무늬가 형성되고 곡선으로 형상이 표현되기 때문에 설계자가 직관에 의해서 모델링하는 것이 용의하지 않고 형상을 추출하는데도 많은 잡음이 생기기 때문에 어려움이 있다. 절점의 밀도를 계산하여 이진화하여 형상을 추출해 낼 경우 요소의 평균밀도로 정의된 절점의 밀도를 이용하기 때문에 Fig. 13 과 같이 바둑판



(a)



(b)

Fig. 11 Michell truss

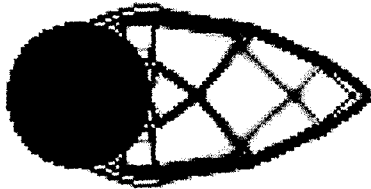


Fig. 12 Topology image of Michell truss

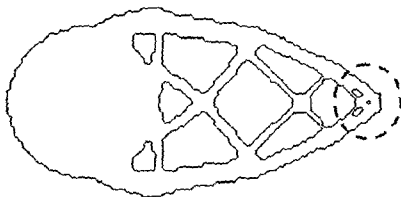


Fig. 13 Boundary contour of Michell truss

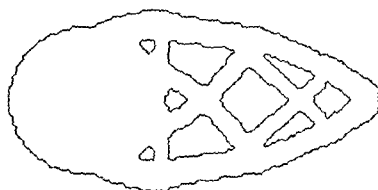


Fig. 14 Dilation image

무늬가 제거가 된 것을 볼 수 있고 미셸 트러스를 형성하는 외형선도 추출해 낼 수 있다. Fig. 13 에서 오른쪽 끝부분에는 설계자가 의도하지 않은 작은 구멍들이 생성된 것을 볼 수 있는데 이것은 모폴로지 기법을 이용하여 제거 할 수 있다. Fig. 14 는 모폴로지 기법의 닫힘연산을 수행하기 위하여

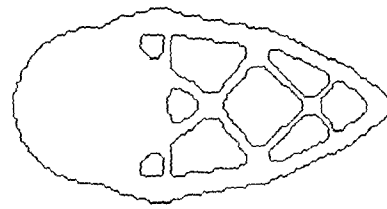


Fig. 15 Erosion image

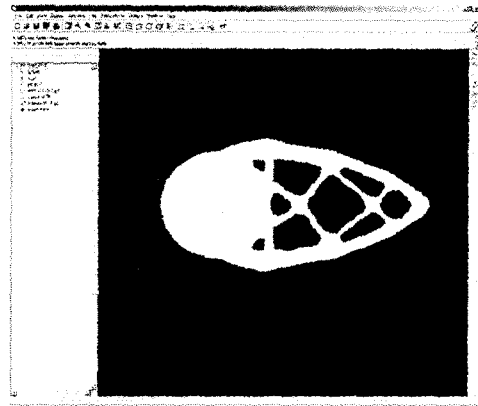


Fig. 16 CAD model of Michell truss

Fig. 13 의 이미지에 팽창연산을 적용한 이미지를 나타내는데 한번의 팽창연산을 통하여 작은 구멍들이 채워지는 효과를 볼 수 있지만 전체적인 구조물의 크기가 확대되었기 때문에 침식연산이 필요하다. Fig. 15 는 닫힘연산을 통해 불필요한 구멍을 제거하고 요소부피비율(Rate)을 조정하여 부피 구속조건을 만족하는 최종형상을 나타낸다. 이러한 과정을 통해 추출된 형상에서 경계를 이루는 점 데이터들을 연결하여 폐곡선을 형성한 후 지그재그한 현상을 제거해 주는 알고리즘과 B-spline 곡선을 이용하여 좀 더 부드러운 곡선을 형성하는 점을 추출하였다. 추출된 점 데이터는 Pro/Engineer의 입력 파일로 저장되고, 그 파일을 Pro/Engineer에서 읽어 들임으로써 Fig. 16 과 같은 2차원 CAD 모델을 생성할 수 있다.

5.2 MBB Beam

MBB 빔(Messerschmitt-Bolkow-Blohm beam)<sup>(1)</sup> 은 여객기 동체 내에 사용되는 보로써 개념설계 단계에서 토폴로지 최적설계를 통하여 기본적인 형상을 추출해 낸 후 세부적인 설계에 들어가기 때문에 토폴로지 이미지의 CAD 모델 생성이 필요하다.

MBB 빔의 초기 설계영역의 크기는 Fig. 17(a)와 같이 2400mm×400mm 의 직사각형으로 하고 보의 형상을 유지하도록 설계영역의 테두리부분은 비설계영역으로 설정하여 항상 직사각형 구조를 형

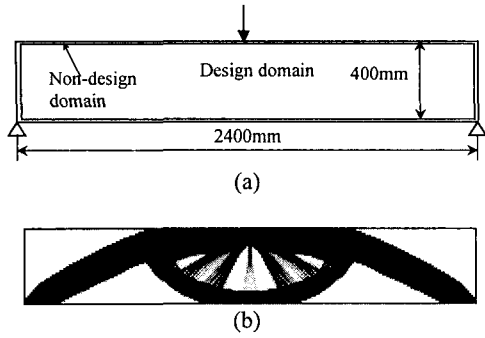


Fig. 17 Topology optimization of MBB beam

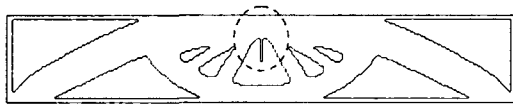


Fig. 18 Boundary contour of MBB beam

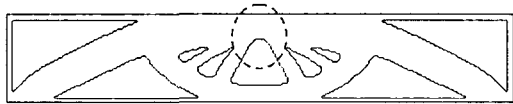


Fig. 19 Opening image of MBB beam

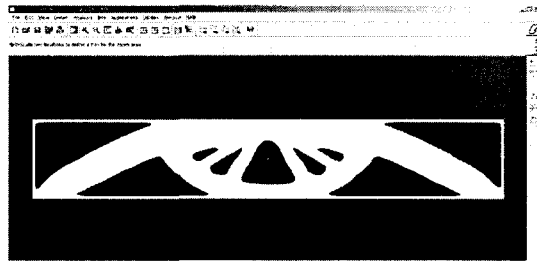


Fig. 20 CAD model of MBB beam

성할 수 있도록 하였다. 유한요소는  $240 \times 40$  개의 4 절점 요소를 사용하였다. Fig. 17(b)는 토폴로지 최적설계를 통해 나온 토폴로지 이미지를 보여준다.

MBB 빔의 토폴로지 이미지에도 바둑판무늬 형상이 나타나는 것을 절점 밀도의 이진화를 통한 형상의 추출로 Fig. 18 과 같이 모두 제거되었다. 다만 가운데 부분에 돌출된 부분은 설계상 불필요한 부분으로 제거되어야 하는데 모폴로지 기법의 열림연산을 통해서 다른 부분에는 영향을 미치지 않고 돌출된 부분만 제거되었음을 Fig. 19 를 통해서 확인 할 수 있다. Fig. 19 와 같이 모폴로지 기

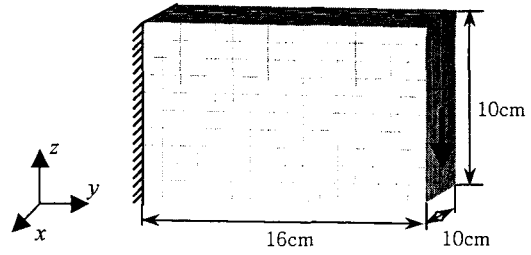


Fig. 21 3D cantilever beam

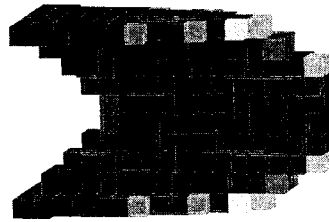


Fig. 22 Topology image of 3D Cantilever beam

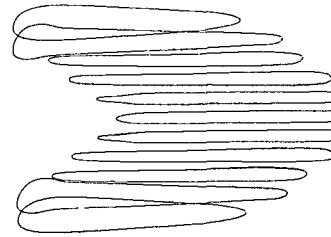


Fig. 23 Section contours of 3D cantilever beam

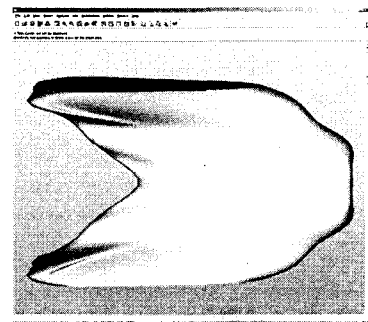


Fig. 24 CAD model of 3D cantilever beam

기법을 통해 수정된 이미지의 경계선을 이루는 점 데이터를 추출해 내어 지그재그한 형상을 제거해주는 알고리즘을 사용한 후 B-spline 곡선을 통해서 부드러운 곡선을 형성하는 점 데이터를

Pro/Engineer의 입력파일로 만들어 준다. 입력파일은 2차원 이미지이기 때문에 1개의 단면과 10개의 곡선으로 이루어져 있으며 Pro/Engineer에서 이 파일을 읽어들이면 Fig. 20과 같이 2차원 모델을 생성하였다.

### 5.3 3D Cantilever beam

지금까지 2차원 모델에 관한 예제를 보였는데 이번에는 3차원 토폴로지 이미지를 해석하여 3D CAD 모델을 생성한 예를 보이도록 한다. Fig. 21과 같이 16cm × 10cm × 10cm의 크기를 갖고 16 × 10 × 10개의 유한요소를 가진 유한요소 모델을 생성한 후 외팔보 끝단에 집중하중이 가해질 때 최대 강성을 갖는 구조물의 형상을 찾기 위한 토폴로지 최적설계를 수행하면 Fig. 22와 같은 3차원 토폴로지 이미지를 생성한다. 절점의 밀도는 3차원 요소들의 밀도를 이용하여 구하고 부피구속조건을 만족하는 임계밀도값을 구하여 이진화된 이미지를 생성한다.

이진화된 이미지에서 형상을 추출해 내기 위하여 z축을 기준으로 xy 평면인 11개의 단면을 설정하면 각 단면은 2차원 토폴로지 이미지가 되므로 앞에서 설명한 방법으로 단면의 외형을 이루는 경계선을 추출하여 Fig. 23과 같은 곡선들의 집합을 얻는다.

각 단면을 이루는 경계선을 점 데이터로 연결하여 Pro/Engineer의 입력파일로 만들고 2차원 모델을 생성한 후 블렌드 함수를 이용하여 각 단면의 2차원 곡선들을 연결하여 3차원 스플라인 곡면을 생성한 CAD 모델은 Fig. 24와 같다

## 6. . 결 론

본 연구에서는 토폴로지 이미지를 이용하여 외형을 추출해내고 외형선을 점 데이터로 연결하여 CAD 모델을 구축하였는데 연구내용을 요약하면 다음과 같다.

- 토폴로지의 이진화 과정에서 절점 밀도를 정의함으로써 바둑판무늬 형상을 제거하고 정확한 부피구속조건을 만족시킬 수 있었다.
- 그래픽 이미지에 사용되는 토폴로지 기법을 토폴로지 이미지에도 적용하여 잡음이나 작은 구멍을 제거할 수 있었다.
- 경계를 이루는 점 데이터를 연결하는 과정에서 지그재그한 형상을 제거하는 알고리즘을 추가하고 각 점들을 조정점으로 하는 B-spline 곡선을 생성함으로써 부드러운 곡선을

이루는 점 데이터를 추출할 수 있었다.

- 범용 CAD 프로그램인 Pro/Engineer에서 점 데이터 파일을 자동으로 읽어들이 3D 모델을 완성하였다.

본 연구에서는 잡음과 실제 필요로 하는 형상과의 명확한 기준이 없으므로 요소단위의 작은 부분을 잡음으로 판단하고 제거하였으나 요소의 크기가 매우 작은 경우에는 토폴로지 기법을 한번 적용하는 것만으로는 잡음이 제거될 수 없다. 따라서 설계자의 의도에 맞는 형상을 추출하기 위해서는 토폴로지 기법을 여러 번 적용할 수 있도록 프로그램을 설계하였으나, 이렇게 할 경우 최초 토폴로지 최적화에 의한 형상과는 다소 다른 형상이 생성될 수도 있으므로 앞으로 이에 따른 보완 연구가 수행되어야 할 것이다.

## 후 기

이 연구는 한국과학재단 지정 최적설계신기술 연구센터의 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) Olhoff, N., Bendsøe, M. P. and Rasmussen, J., 1991, "On CAD-integrated structural topology and design optimization," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 89, pp. 259-279.
- (2) Bendsøe, M. P. and Kikuchi, N., 1988, "Generating Optimal Topologies for Structural Design Using a Homogenization Method," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 71, pp. 197-224.
- (3) Kumar, A. D. and Gossard, D. C., 1996, "Synthesis of Optimal Shape and Topology of Structures," *Journal of Mechanical Design - Transaction of the ASME*, Vol. 118, pp. 68-74.
- (4) Lin, C. Y. and Chao, L. S., 2000, "Automated image interpretation for integrated topology and shape optimization," *Structural Multidisciplinary Optimization*, Vol. 20, pp. 125-137.
- (5) Hsu, Y. L., Hsu, M. S. and Chen, C. T., 2001, "Interpreting results from topology optimization using density contours," *Computers and Structures*, Vol. 79, pp. 1049-1058.
- (6) Youn, S. K. and Park, S. H., 1997, "A Study on the shape extraction process in the structural topology optimization using homogenized material," *Computers and Structures*, Vol. 62, pp. 527-538.
- (7) Castleman, K. R., 1996, *Digital Image Process*, Prentice Hall, pp. 470-475.
- (8) Prager, W., 1974, "A Note on Discretized Michell Structures," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 3, pp. 349-355.