

## 위상최적설계 결과를 이용한 CAD 인터페이스

김성훈\*, 민승재\*\*, 이상현\*\*\*

### CAD Interface using Topology Optimization

Seong Hoon Kim\*, Seungjac Min\*\* and Sang Hun Lee\*\*\*

#### ABSTRACT

Topology optimization has been widely used for the optimal structure design for weight reduction and high performance. Since the result of three-dimensional topology optimization is represented by the discrete material distribution in finite elements, it is hard to interpret from a design point of view. In this paper, the method for interpreting three-dimensional topology optimization result into a series of cross-sectional curve representation is proposed and interfaced with the existing CAD system for the practical use. The concept of node density and virtual grid is introduced to transform element density values into grid density and material boundaries in each cross section are identified based on the element volume rate to satisfy the amount of material specified in the original design intent. Design examples show that three-dimensional topology result can be converted into a form of curve CAD model and the seamless interface with CAD software can be achieved.

**Key words** : CAD Interface, Topology Optimization, Finite Element Model, Virtual Grid

### 1. 서 론

시뮬레이션기반 구조물 경량화 설계를 위하여 초기 설계안인 기하 CAD모델로부터 이산화된 해석모델을 생성하고 구조해석 및 위상최적화를 수행하는 일련의 과정을 진행하지만, 그 결과는 해석모델에만 반영된 것이고 CAD모델에 반영하기 위해서는 설계자가 해석결과를 보고 판단하여 수작업으로 초기 CAD모델을 수정하는 방식으로 진행하고 있는 실정이다. 또한 개념설계 단계에서는 CAD모델 없이 직접 유한요소 해석모델로부터 설계 프로세스를 진행할 수도 있으므로 이러한 경우 해석결과를 반영한 CAD모델 자체가 존재하지 않는다. 따라서 설계프로세스의 중심이 되는 CAD모델과 시뮬레이션기반 설계에 필수적인 해석모델이 동시에 요구되는 현재 CAD/CAE 개발환경 하에서 기존의 CAD모델로부터 해석모델을 생성하는

Top-Down형식의 모델변환뿐 아니라 해석결과로부터 CAD모델을 수정 또는 생성하는 Bottom-Up형식의 모델변환이 필요하며, 이러한 상호 유기적인 모델변환이 가능해짐으로써 진정한 의미의 시뮬레이션기반 설계의 효율이 극대화될 수 있다.

현재 CAD모델로부터 유한요소 해석모델을 생성하는 과정은 부분적으로 자동화를 지원하는 상용 전처리 소프트웨어들이 제공되어 설계 프로세스의 시간을 단축할 수 있는 반면, 해석이나 최적설계 결과를 CAD모델에 반영하는 상용 소프트웨어는 거의 없거나 그 기능이 미약한 수준이다<sup>1,2</sup>. 최근 상용 CAD시스템에서 기본적인 구조해석이나 최적화 기능을 구비하여 자체적으로 설계변경내용을 CAD모델에 반영할 수 있는 모듈을 발표하고 있으나 아직 현업에 적용할 만큼 검증받지 못하고 있는 실정이다. 또한 CAD모델 수정을 설계자가 수작업으로 진행함으로써 시간을 들여 계산한 해석결과를 제대로 CAD모델에 반영하지 못하는 결과를 초래하고 이는 성능확인을 위한 시뮬레이션의 반복수행으로 인하여 설계 프로세스 전체를 지연시키는 원인이 될 수 있다. 따라서 해석결과로부터 CAD모델을 생성하는 과정을 부분적이라도 자동화할 수 있다면 제품설계에 있어서 시간 단축을 체계

\*비회원, 한양대학교 기계설계학과

\*\*교신저자, 종신회원, 한양대학교 기계공학부/자동차공학과

\*\*\*종신회원, 국민대학교 기계자동차공학부

- 논문투고일: 2008. 09. 22

- 논문수정일: 2009. 05. 05

- 심사완료일: 2009. 07. 07

적으로 확보할 수 있다.

현재 구조를 경량화 설계에 활용하고 있는 상용 소프트웨어인 HyperWorks<sup>15)</sup>에서는 위상최적설계 결과를 CAD모델로 변환시키는 기능을 제공하고 있다. 그러나 생성된 CAD모델은 삼각형 폴리곤 세트로서 이를 이용하여 추후 수정 및 추가 모델링 작업을 하기에는 부적절하므로 설계업무에 적합한 CAD모델을 생성할 필요가 있다. 3차원 위상최적설계 결과를 바탕으로 CAD모델을 생성하는 연구로 Tang과 Chang<sup>16)</sup>은 단면에서의 경계 평활화를 통하여 B-spline곡선을 생성하고 이를 기준으로 스키닝하여 3차원 서피스를 생성하였다. 이후 Hsu와 Hsu<sup>17)</sup>는 절점 노드 밀도를 활용하여 단면 곡선을 생성한 후 스위핑을 이용하여 3차원 모델을 구축하였다. 한편 Koguchi와 Kikuchi<sup>18)</sup>는 요소 삼각화를 통한 등밀도 서피스(isosurface) 추출 알고리즘을 응용하여 단면 등밀도 서피스를 생성한 후 쌍이차 스플라인 서피스를 재구축하였다. 기존 연구들에서는 위상최적설계시 지정한 재료사용량을 고려하지 않고 곡선 또는 곡면을 생성하므로 설계자의 의도를 반영하지 못하는 문제점이 있다. 또한 정확한 형상의 CAD모델 생성 자체를 정의하기가 어려우므로 위상최적설계 결과를 해석하는 설계자가 의도하는 서피스 또는 솔리드 모델을 생성할 수 있도록 CAD시스템에 곡선모델로 제공하는 가이드라인 역할을 수행하는 것이 현실적이라고 판단한다.

따라서 본 연구의 목적은 크게 두 가지로 정리할 수 있다.

- 위상최적설계 결과인 3차원 공간상의 이산화된 밀도분포 데이터를 이용하여 CAD모델을 생성할 수 있는 인터페이스 모듈의 방법론을 제안한다.
- 구조 해석 및 설계에 활용하고 있는 유한요소 전후처리 소프트웨어 HyperMesh와 3차원 CAD시스템인 Pro/ENGINEER와의 인터페이스 프로그램을 작성한다.

본 연구에서는 구조물 경량화 설계에 사용하고 있는 OptiStruct의 밀도분포 결과를 HyperMesh와의 인터페이스를 통하여 추출한다. 3차원 공간상의 밀도 분포 데이터로부터 CAD모델을 생성하기 위하여 3차원 좌표계를 통하여 연속적인 단면으로 구성할 방향을 설정한 후 가상 그리드를 생성하여 유한 요소의 밀도를 변환한다. 유한 요소의 밀도를 사용할 경우 나타나는 바둑판 형상을 제거하기 위하여 절점의 밀도를 정의하고 부피 제한조건을 만족하는 경계 밀도값을 구하여 이진화를 수행한다. 이미지 프로세싱의 모폴로지 기법인 침식이나 팽창연산을 이용하여 자동으로 불

필요한 잡음이나 작은 구멍을 제거하여 좀더 나은 형상을 생성하고 부드러운 외형선을 추출하기 위한 평활화 알고리즘을 사용한다. 생성한 연속적인 단면 형상곡선들을 3차원 CAD시스템인 Pro/ENGINEER에서 불러 들여서 설계자가 수정하고 곡면을 생성할 수 있도록 지원한다<sup>19)</sup>. 따라서 제안하는 위상최적설계/CAD 인터페이스 모듈의 내용은 Fig. 1과 같다.

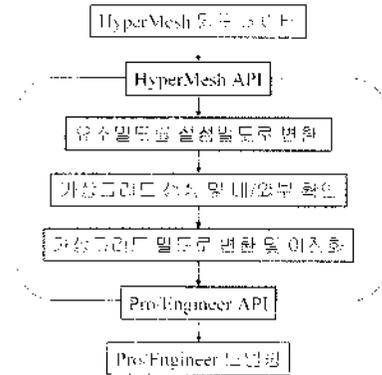


Fig. 1. Process of Topology Optimization/CAD interface.

## 2. 밀도 분포 데이터로부터 곡선 생성

본 연구는 위상최적설계 결과인 밀도 분포 데이터로부터 곡선 모델을 생성하는 방법을 제안한다. 디지털 이미지로 표현되는 밀도 분포 데이터를 곡선 모델로 변환하기 위한 첫 번째 단계는 절점 밀도를 생성하는 것이다. 이는 형상 추출을 위한 이진화에 의한 모델 끊김 현상을 방지하기 위하여 유한 요소 모델의 요소 밀도를 절점 밀도로 변환하는 것이다. 다음 단계로 가상 그리드를 생성하고 유한 요소 모델의 절점 밀도를 가상 그리드의 절점 밀도로 변환한다. 가상 그리드는 3차원 공간의 가상 격자로 전체 유한 요소 모델을 포함할 수 있는 최소 크기로 0~1 사이 값을 갖는 그리드 절점으로 구성된다. 변환 밀도를 생성하는 방법으로 디지털이미지 처리 기법인 가중치 평균 필터 (Weighted Average Filters) 기법<sup>20)</sup>을 사용한다. 가중치 평균 필터 기법으로 생성된 가상 그리드 절점 밀도는 부피 제한조건을 만족시키는 임계 절점 밀도를 기준으로 0과 1의 값으로 이진화된다. 마지막 단계에서 이진 데이터를 처리하여 곡선을 생성하고 이를 CAD와 인터페이스한다.

### 2.1 절점 밀도

위상최적설계 결과는 부피를 갖는 요소의 밀도값으

로 출력되므로 요소의 밀도를 이용할 경우 정확한 형상을 추출하는데 어려움이 있다. 특히 요소의 크기가 설계영역에 비하여 상대적으로 크다면 정확한 임계값을 결정하기 어려울 뿐 아니라 임계값을 계산하여 이진 이미지로 변환한다고 해도 경계선이 매끄럽게 나오지 않고 연속된 구조물이 아닌 끊어진 형상이 된다. 요소의 크기가 작은 경우에도 매끄럽지 않은 형상이나 끊어진 형상이 나타날 수 있고 비특판 무너형상도 빈번하게 발생하기 때문에 이러한 문제점을 해결하기 위하여 절점 밀도 개념을 도입하여 이진화된 이미지를 생성하고 형상을 추출한다.

절점 밀도는 절점을 포함하고 있는 요소들의 평균 밀도값으로 다음과 같이 계산된다.

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

여기서,  $N$ 은 절점을 공유하고 있는 요소 수이고  $\rho_{ele}^i$ 는 절점을 공유하고 있는 요소의 밀도를 나타낸다. Fig. 2는 절점의 위치에 따라 절점 밀도값이 다르게 계산되는 것을 보여준다.

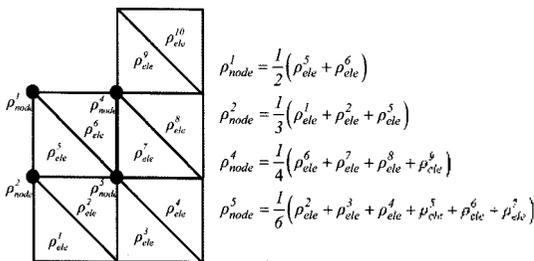


Fig. 2. Calculation of node density.

## 2.2 가상 그리드

서로 다른 유한 요소들(TETRA, HEXA, PENTA)로 이루어진 유한 요소 모델로부터 동일한 알고리즘으로 곡선 CAD모델을 생성하기 위하여 가상 그리드를 도입한다. 유한 요소 모델의 밀도 데이터를 통한 절점 밀도의 정의, 가상 그리드 절점의 내/외부 구분, 가상 그리드 절점 밀도로 변환, 변환된 가상 그리드 절점 밀도의 이진화, 이진화된 절점 밀도를 통한 곡선 생성의 전체 과정이 가상 그리드의 도입을 통하여 모든 요소들에 동일하게 적용된다.

### 2.2.1 내/외부 판단

가상 그리드를 생성한 후 유한 요소 모델의 내부에 있는 가상 그리드 절점을 검색한다. 그리드 절점의 내/외부 판단은 내부 그리드 절점에만 변환 밀도값이 생

성되도록 하기 위함이다. 유한 요소 모델에 대한 가상 그리드의 내/외부 판단을 위하여 각각의 유한 요소 절점을 이용하여 음함수(implicit) 형태의 평면방정식을 유도한다. 본 연구에서는 식 (2)와 같이 각각의 유한 요소 절점들을 이용하여 평면의 방정식을 유도한 후, Fig. 3과 같이 유한 요소의 도상 좌표를 이용하여 각각의 평면 법선 벡터 방향을 각 요소의 내부로 조정하고, 가상 그리드 절점의 내/외부를 판단한다. 이를 전체 유한 요소 모델에 대하여 실시하여 최종적으로 내부와 외부에 있는 가상 그리드를 구분한다.

$$f = Ax + By + Cz + D = 0 \quad (2)$$

$A, B, C$  :  $x, y, z$  components of normal vector

$D$  is obtained by substituting one point on the plane

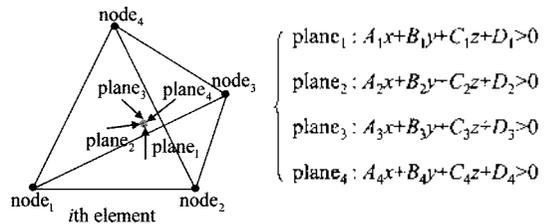


Fig. 3. In/Out check of virtual grid.

평면방정식에 가상 그리드 절점  $P$ 를 대입하면 그 부호에 따라 다음과 같이 분류할 수 있다.

$$\begin{cases} f(\mathbf{P}) > 0 : \text{in} \\ f(\mathbf{P}) = 0 : \text{on} \\ f(\mathbf{P}) < 0 : \text{out} \end{cases} \quad (3)$$

### 2.2.2 변환 밀도

가상 그리드 절점 밀도를 생성하는 방법으로 디지털 이미지 처리 기법인 가중치 평균 필터기법을 사용한다. 가중치 평균 필터기법은 Fig. 4와 같이 가상 그리드 절점을 기준으로 가중치를 부여하기 위한 최소반경( $r_{min}$ )을 생성하고, 최소반경 내부에 있는 유한 요소의 절점들에 가중값( $w^{(n)}$ )을 부여한다. 가중값은 최소반경에서 유한 요소의 절점( $n$ )과 가상 그리드 절점( $i$ )사이의 거리( $dist(i, n)$ )를 뺀 값으로 다음과 같다. 따라서 유한 요소의 절점 밀도( $\rho_{old}^{(n)}$ )로부터 가상 그리드 절점 밀도( $\rho_{new}^{(i)}$ )는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$w^{(n)} = \begin{cases} r_{min} - dist(i, n) & \text{if } dist(i, n) \leq r_{min} \\ 0 & \text{if } dist(i, n) > r_{min} \end{cases} \quad (4)$$

$$\rho_{new}^{(i)} = \sum_{n=1}^k w^{(n)} \rho_{old}^{(i)} / \sum_{n=1}^k w^{(n)} \quad (5)$$

가상 그리드의 크기, 단면 사이의 간격, 변환 밀도를 구하기 위한 최소반경 설정은 Fig. 5와 같다. 가상 그리드의 크기는 유한 요소들 중 가장 작은 요소의 대각선길이( $D_{min}$ )를 기준으로  $s_g$ 배 스케일링하고, 가상 그리드 사이의 간격은  $D_{min}$ 을 기준으로  $s_h$ 배 스케일링한다. 변환밀도를 구하기 위한 최소반경( $r_{min}$ )은 유한 요소들 중 가장 큰 요소의 대각선길이( $D_{max}$ )를 기준으로  $p$ 배 스케일링한다.

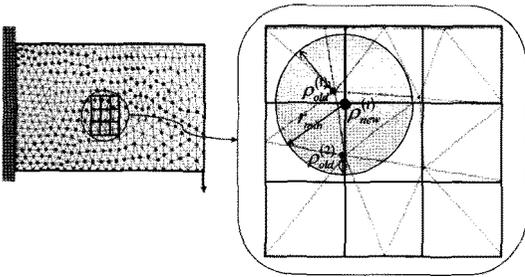


Fig. 4. Transformation of density value from FE nodes to virtual grids.

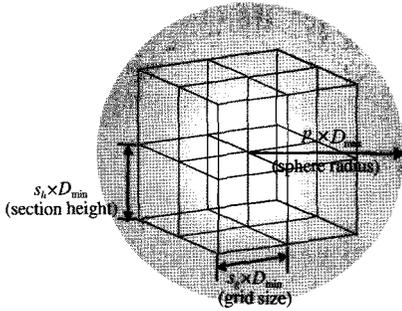


Fig. 5. Definitions of grid size, sphere radius and section height.

2.2.3 변환 밀도의 이진화

위상최적설계에서 부피 제한조건( $V_{constrain}$ )을 이용하여 임계 밀도값( $\rho_{th}$ )을 구하고 그 값을 기준으로 변환된 가상 그리드 절점의 밀도값( $\rho$ )을 이진화한다. 임계 밀도값을 구하기 위한 과정으로 설계조건으로 제한된 구조물의 부피를 다음과 같이 구한다.

$$V_{constrain} = V_{Total} \times C \text{ where } V_{Total} = \sum_{i=1}^N V_{ele}^i \quad (6)$$

여기서,  $N$ 은 총 유한 요소 개수를 나타내고,  $V_{ele}^i$  는 각 요소의 부피이다.  $C$ 는 재료의 사용 비율인데 위상

최적설계를 수행할 때 사용하는 부피 제한조건으로 전체 설계영역의 30%에 해당되는 재료를 사용한다면  $C$ 값은 0.3이 된다. 설계영역의 전체 부피( $V_{Total}$ )는 각 요소의 부피를 모두 합하여 구하고 제한조건으로 사용된 부피는 전체 부피에서 재료사용 비율로 계산한다.

각 요소를 이루고 있는 절점의 밀도값이 임계 밀도값보다 크면 1로, 작으면 0으로 이진화하면 모든 요소들은 Fig. 6과 같이 10가지로 분류되는데 각 요소에 해당되는 요소 부피비(Rate)를 계산하여 해당 임계 밀도값에 해당하는 임계 부피값을 구한다. 부피 구속조건을 만족하는 임계 밀도값을 찾기 위하여 초기값을 0.5로 설정하고 그 값에 해당하는 구조물의 임계 부피값( $V_{th}$ )은 다음과 같이 구한다.

$$V_{th} = \sum_{i=1}^N (Rate \times V_{ele}^i) \quad (7)$$

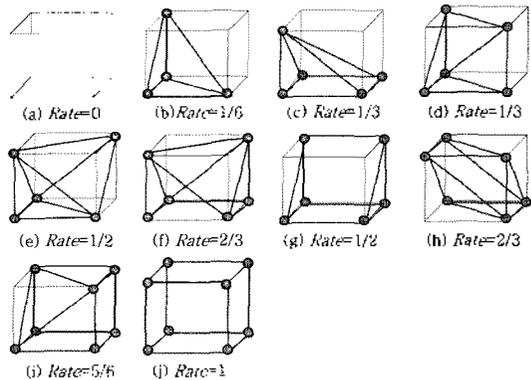


Fig. 6. Classification of element volume rate.

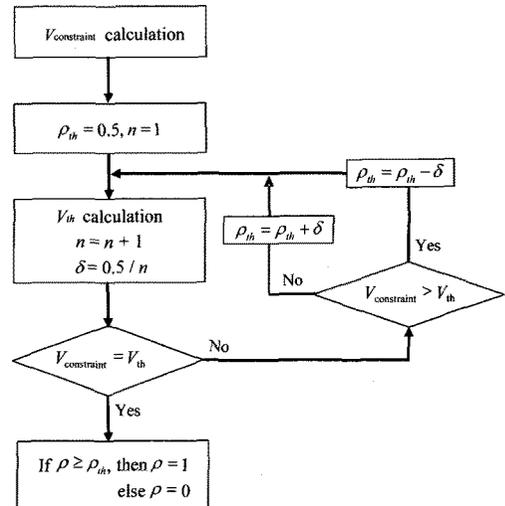


Fig. 7. Process of assigning binary values.

임계 부피값을 구한 후 부피 제한조건과 비교하여 만약 부피 제한조건이 임계 부피값보다 크면 임계 밀도값을 감소시키고 임계 부피값보다 작으면 임계 밀도값을 증가시키는 방법으로 임계 부피값과 부피 제한조건이 같아지는 임계 밀도값을 찾게 된다. 이상 설명한 그리드 절점 밀도의 이진화 과정은 Fig. 7과 같이 정리할 수 있다.

2.3 곡선 생성

그리드 절점 밀도의 이진화 과정을 통하여 형상 표현에 필요한 그리드 절점을 추출한 후 각 단면을 기준으로 외형선을 이루는 절점들을 연결하여 폐곡선을 생성함으로써 곡선 CAD모델을 생성할 수 있다. 절점 데이터를 연결하여 곡선을 생성할 경우 평활화를 위하여 지그재그 방지 알고리즘을 적용하였다[6].

3. I/O 인터페이스

3.1 HyperWorks 인터페이스

구조물의 경량화 설계를 위한 위상 최적화 프로그램인 OptiStruct를 수행하는데 있어서 최적화에 필요한 유한 요소 모델의 생성과 결과의 출력은 전후 처리 프로그램인 HyperMesh를 사용한다. 최적화를 수행하기 위한 이 두 프로그램간의 인터페이스 구조는 Fig. 8과 같다.

OptiStruct 입력 파일(\*.fem)의 형식은 Fig. 9와 같이 세 부분으로 구성된다. 결과 파일의 형식은 I/O Options section의 설정을 통하여 제어된다. Fig. 10은 본 연구에 필요한 ASCII 형식의 결과 파일(\*.dens)을 얻기 위한 HyperMesh 내의 설정을 나타낸다. Subcase Information section은 최적화를 수행하기 위해 적용되는 경계조건과 최적화의 목적함수 정보를 포함한다. Bulk Data section은 절점 좌표 및 요소의 종류와 연결성, 재료 상수, 경계 조건 등의 유한 요소 모델에 대한 모든 정보와 최적화를 수행하기 위한 정보를 포함한다.

위상 최적화 수행의 결과로 HyperMesh 결과 파일(\*.res), 해석 정보 파일(\*.out)과 입력파일의 I/O Options 설정에 의한 결과 파일(\*.dens)이 생성된다. HyperMesh 결과 파일은 OptiStruct와 HyperMesh간의 인터페이스를 위한 결과 파일이므로 본 연구에서는 고려하지 않는다. 해석 정보 파일에는 Fig. 11과 같이 최적화 과정에서 각 iteration의 목적함수값 등이 포함되어 있다. I/O Options 설정에 의한 결과 파일은 Fig. 12와 같이 최적화 수행과정 중 각 iteration에서

의 요소의 밀도값을 포함한다.

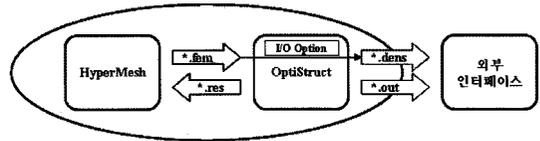


Fig. 8. Interface structure.

```

$
FORMAT OPT1
$ I/O options section
$ SHOWING LOADSTEP 1 "ps"
$
SUBCASE 1
  SPC = 2
  LOAD = 3
$ BEGIN BULK
$ ERIG Data
$
GRID 5040 0.0 0.0 0.0
GRID 5241 0.0 0.0 0.0
...

$ CENEA Elements: First Order
$
ENEA 7000 3 9951 9952 9950 9950 10102 10102
ENEA 10100 10100
...

$ FORCE Data
$
FORCE 3 7050 01.0 0.0 0.0 -10000.0
$
$ SPC Data
$
SPC 2 10100 1234560.0
SPC 2 10100 1234560.0
...
    
```

Fig. 9. Input file (\*.fem) format.

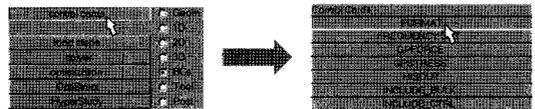


Fig. 10. I/O option setting.

```

ITERATION 31
The 2nd satisfied convergence ratio = 2.3201E-04

Objective Function (Minimize COMPL) = 3.41805E+03 % change = -6.02
Maximum Constraint Violation % = 0.0000E+00
Design Volume Fraction = 5.0000E-01 Mass = 0.0000E+00

Subcase Weight Compliance
1 1.000E+00 3.41805E+03 Weight*Comp. 3.41805E+03

Sum of Weight*Compliance 3.41805E+03
    
```

Fig. 11. Result file (\*.out) format.

```

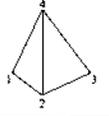
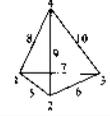
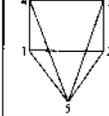
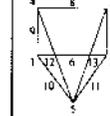
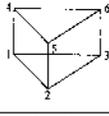
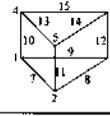
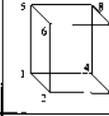
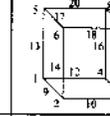
iter 31 3040
3041 1.0000E-02
3042 1.0000E-02
3043 1.0000E-02
3044 1.0000E-02
3045 1.0000E-02
3046 1.0000E-02
3047 1.0000E-02
3048 1.0000E-02
3049 1.0000E-02
3050 1.0000E-02
3051 1.0000E-02
...
    
```

Fig. 12. Element density file (\*.dens) format.

3.2 유한 요소 모델 정의

본 연구에서 사용한 유한 요소 모델은 절점(node), 요소(element), 모델 정보의 3가지 자료구조로 구성된다. 절점 정보는 절점의 좌표 값과 꼭지점 여부에 대한 정보를 포함한다. 요소 정보는 요소의 연결성, 종류와 밀도값을 포함한다. 본 연구에서 다루고 있는 유한 요소의 종류는 Table 1과 같으며 절점에 부여된 번호순서로 연결성을 유지하여야 한다. 모델 정보는 모델의 총 부피와 부피 제한조건으로 이루어진다. Fig. 13은 유한 요소 모델을 구성하는 자료구조와 각 정보를 얻기 위한 결과 파일 간의 관계를 나타낸다.

Table 1. Classification of finite elements

			
4-node tetra	10-node tetra	5-node pyramid	13-node pyramid
			
6-node penta	15-node penta	8-node hexa	20-node hexa

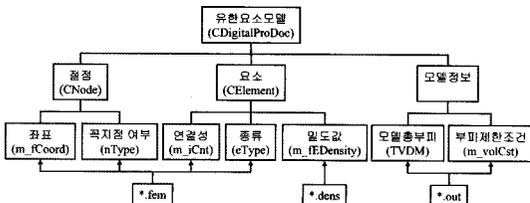


Fig. 13. Data structure of finite element model.

3.3 Pro/ENGINEER 인터페이스

변환 밀도에 의하여 이진화된 점 데이터를 이용하여 상용 CAD프로그램인 Pro/ENGINEER의 입력파일 (\*.ibl)을 생성한다. 입력 파일은 곡선을 이루는 점 데이터로 이루어져 있으며, Fig. 14는 입력파일의 예를 나타낸 것으로 "begin section"은 새로운 단면이 시작하는 것을 의미하고 "begin curve"는 단면을 구성하고 있는 폐곡선 상의 점 좌표가 시작되는 것을 뜻한다. Pro/ENGINEER에서 이 파일을 읽어 들여 각 점들을 연결하는 2차원 스플라인 곡선을 생성한다. 모든 곡선은 폐곡선을 이루어야 하기 때문에 시작점과 끝점은 같아야 한다. 각각의 ibl파일은 같은 평면상의 곡선들로 이루어져 있으며, 단면이 총 N개로 이루어

질 경우 N개의 ibl 파일이 생성된다. 단면 곡선 파일들을 자동으로 입력 받기 위하여 텍스트 파일 형식의 스크립트 파일을 이용한다.

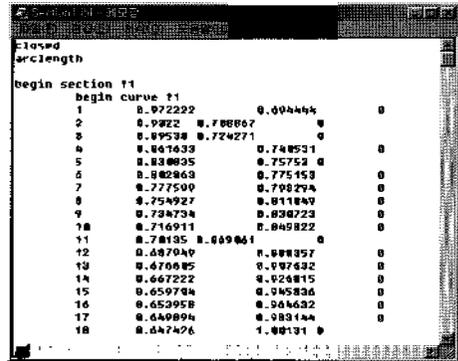


Fig. 14. Curve section data.

4. 설계 예제

4.1 검증용 위한 문헌 사례

Fig. 15는 간단한 의자설계를 위한 위상최적설계의 설계영역, 하중조건 및 경계조건을 나타내고 있고, 부피 제한조건은 25%이다<sup>[9]</sup>. 설계영역을 4076개의 HEXA8요소로 모델링한 유한 요소 모델과 7583개의 TETRA10요소로 모델링한 유한 요소 모델의 위상최적설계 결과를 비교하였다. 설계 파라미터는  $p = 1.5$ .

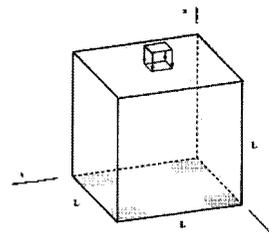


Fig. 15. Design domain of a stool design problem.

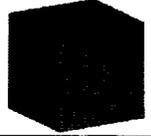
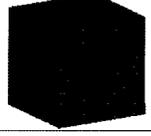
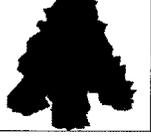
	FEM model	HyperWorks	Curve CAD Model
HEXA8			
TETRA10			

Fig. 16. Results of a stool design problem.

$s_g = 1/5$ ,  $s_h = 1/7$ 을 설정하였고, 그 결과는 Fig. 16과 같다. HEXA8요소의 경우 모든 요소크기가 일정한 반면 TETRA10 요소의 경우 경계면에서 내부로 사면체를 생성하므로 그 크기가 일정하지 않아서 HEXA8 요소의 경우보다는 부정확한 형태의 형상을 도출함을 알 수 있다.

4.1.1 그리드 크기에 따른 영향

가상 그리드 크기와 관련된  $s_g$ 의 변화에 따른 영향을 살펴본다. 설계 파라미터는  $p = 1.5$ ,  $s_h = 1/7$ 로 고정하였으며  $s_g$ 의 변화에 따른 곡선 CAD모델 생성 결과는 Fig. 17과 같다. 다음 결과로부터 가상 그리드 크기와 곡선 CAD모델의 정확성이 반비례 관계임을 알 수 있다.

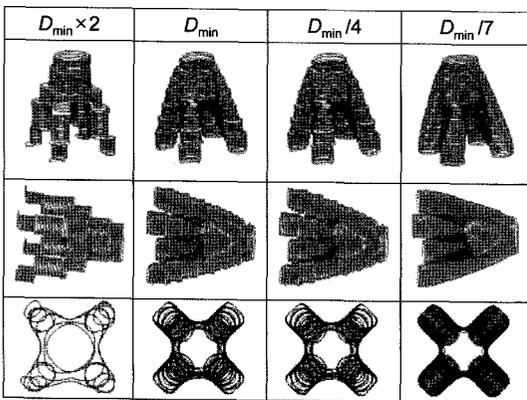


Fig. 17. Comparison of different virtual grid sizes.

4.1.2 단면 사이의 간격에 따른 영향

설계 파라미터를  $p = 1.5$ ,  $s_g = 1/5$ 로 고정한 후 단면 사이의 간격을  $D_{min}$ 의 2배, 1배, 0.5배, 0.2배로 각각 변화시키면서 곡선 CAD모델 생성 결과에 미치는 영

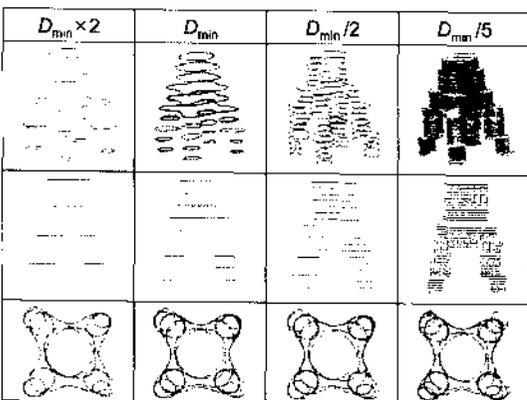


Fig. 18. Comparison of different section heights.

향을 살펴보았다. 생성된 곡선 CAD모델의 형태는 Fig. 18과 같으며 단면 사이의 간격이 적을수록 단면 개수가 증가하여 보다 상세한 기하 정보를 얻을 수 있고, 단면 표현의 정확성과는 무관함을 알 수 있다.

4.1.3 최소반경에 따른 영향

가상 그리드의 변환밀도를 계산하는 파라미터인  $p$ 의 변화에 따른 영향을 살펴본다. 가상 그리드 크기( $s_g = 1/5$ )와 단면 사이 간격( $s_h = 1/7$ )은 고정하고  $p$ 를 확대, 축소하여 생성한 곡선 CAD모델 결과는 Fig. 19와 같다. 최소반경을 확대하면 변환밀도 계산에 포함되는 요소 수가 증가하여 전체적으로 필터링된 모델을 생성할 수 있는 반면, 축소하면 평활화되지 않은 국부 형상을 생성할 수 있으므로 설계 의도에 따라서 이 파라미터를 조정하여 유연한 형상 설계가 가능하다.

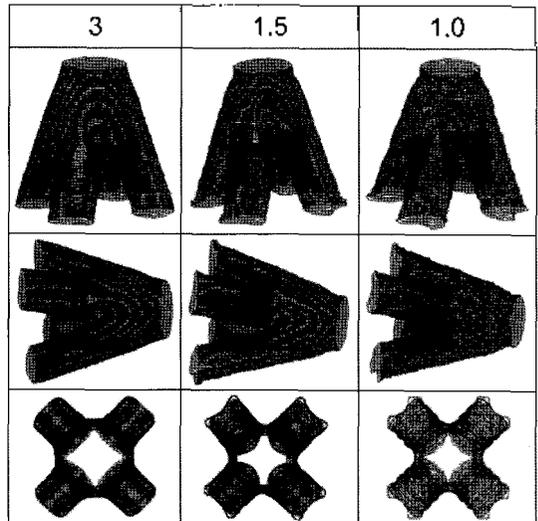


Fig. 19. Comparison of different sphere radii.

4.2 컨트롤 암 설계

본 연구에서 제안한 방법론과 개발한 프로그램을 사용하여 자동차 현가장치로 사용되는 더블위시본 타입 서스펜션(double wishbone type suspension)의 로어 컨트롤암(Lower Control Arm)의 경량화 설계에 적용하여 그 타당성을 검토하였다. 설계영역을 10,826개의 HEXA요소로 모델링 한 유한 요소 모델에서 설계영역의 45% 재료량을 사용하도록 한 위상최적설계 결과 밀도 분포 데이터는 Fig. 20과 같다. 검은색 부분이 경량화를 위하여 재료를 제거해야 할 설계영역을 나타낸다. 입력 파라미터인 그리드 크기( $s_g = 1$ ), 단면 사이 간격( $s_h = 1/2$ ), 최소반경( $p = 1.5$ )을 설정한 결과 Fig. 21

과 같은 곡선 CAD모델을 생성하였고, 이 곡선들은 설계자가 의도한 구조물의 중량을 만족시키는 곡면 및 솔리드 모델을 생성하는 기초 데이터로 활용하여 제품 설계 시간 단축에 유용하리라 예상된다.

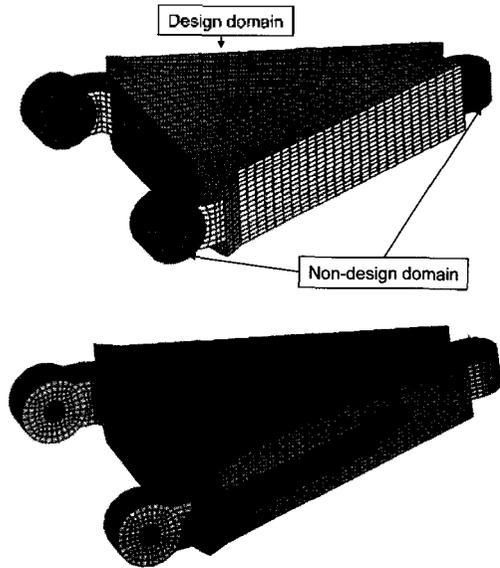


Fig. 20. Topology optimization of lower control arm.

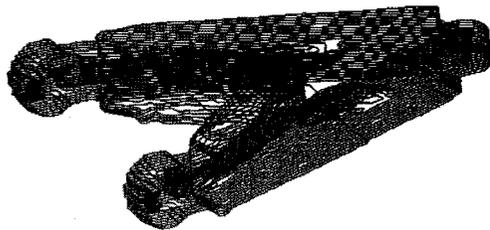
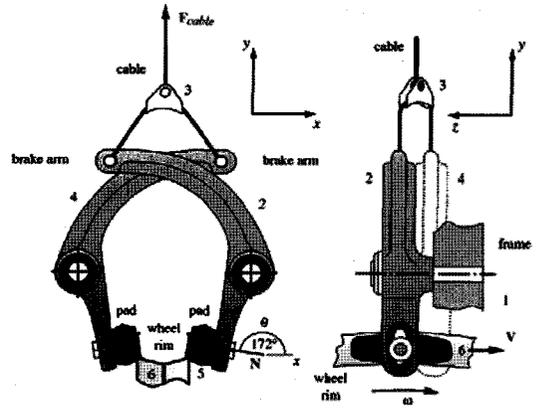


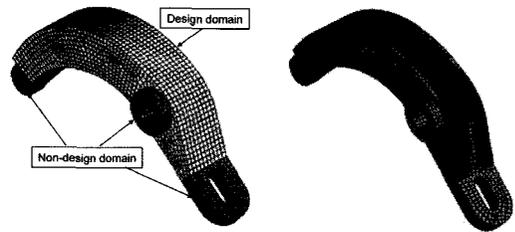
Fig. 21. Curve CAD model.

### 4.3 자전거 브레이크 암 설계

최근 녹색성장의 동반자로 주목을 받고 있는 자전거의 주요 부품인 브레이크 암의 경량화 설계를 추가 예제로 선정하여 본 연구 결과를 적용하였다. Fig. 22(a)와 같은 기존 설계 형상<sup>10)</sup>을 참고하여 설계영역을 설정한 후 7,233개의 HEXA요소로 모델링하였고, 그 영역의 35%에 해당하는 재료량으로 구한 새로운 형태의 브레이크 암 밀도분포는 Fig. 22(b)와 같다. 다음과 같은 그리드 크기( $s_g = 1/2$ ), 단면 사이 간격( $s_n = 1/2$ ), 최소반경( $p = 1.5$ )을 사용하여 Fig. 23과 같은 곡선 CAD모델을 생성하였다. 본 연구에서 개발한 프로그램을 활용하여 이 재료분포 결과를 곡선 CAD모델로 생성하여 설계자의 3D모델링 작업의 효율성을 높이고 설계시간을 단축할 수 있으리라 기대한다.



(a) initial design



(b) topology optimization result

Fig. 22. Bicycle brake arm design.



Fig. 23. Curve CAD model.

## 5. 결 론

본 연구에서 제안한 위상최적설계 결과를 이용한 CAD인터페이스에 관한 내용은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 3차원 위상최적설계 결과에 사용한 재료량을 유지하도록 가상그리드를 도입하고 요소 부피비를 구분하여 단면 곡선들을 생성하는 알고리즘을 제안하였다.
- 경량화 위상최적설계를 수행한 HyperWorks의 결과를 이용하여 상용 CAD시스템인 Pro/ENGINEER

에서 곡선모델을 자동으로 생성할 수 있는 인터페이스 모듈을 개발하였다.

- 개발한 프로그램을 간단한 문헌 예제에 적용하여 설정한 파라미터들의 영향을 비교하였고, 제품설계에 적용 가능성을 확인하였다.

### 감사의 글

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2006-311-D00015).

### 참고문헌

1. Olhoff, N., Bendsøe, M. P. and Rasmussen, J., "On CAD-integrated Structural Topology and Design Optimization", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 89, No. 1/3, pp. 259-279, 1991.
2. Langer, H., Puhlhofer, T. and Baier, H., "An Approach for Shape and Topology Optimization Integrating CAD Parameterization and Evolutionary Algorithms", *Proceedings of Multidisciplinary Analysis and Optimization*, AIAA-2002-5498, pp. 920-930, 2002.
3. www.altair.com
4. Tang, P.-S. and Chang, K.-H., "Integration of Topology and Shape Optimization for Design of Structural Components", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 22, pp. 65-82, 2001.
5. Hus, M.-H. and Hsu, Y.-L., "Interpreting Three-dimensional Structural Topology Optimization Results", *Computers & Structures*, Vol. 83, pp. 327-337, 2005.
6. Koguchi, A. and Kikuchi, N., "A Surface Reconstruction Algorithm for Topology Optimization," *Engineering with Computers*, Vol. 22, pp. 1-10, 2006.
7. Lee, D. and Min, S., "CAD Model Construction Using Topology Image", *Transactions of the KSME, A*, Vol. 27, No. 11, pp. 1925-1932, 2003.
8. Gonzalez, R. C. and Woods, R. E., *Digital Image Processing (Second Edition)*, Prentice Hall, pp. 116-136, 2002.
9. Borrvall, T. and Petersson, J., "Large-scale Topology Optimization in 3D Using Parallel Computing", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 190, pp. 6201-6229, 2001.
10. Norton, R. L., *Machine Design: An Integrated Approach (3rd Ed.)*, Pearson Prentice Hall, Singapore, pp.94.



#### 김 성 훈

2005년 한양대학교 기계공학과 학사  
 2007년 한양대학교 기계설계학과 석사  
 2007년~현재 삼성전자 DMC부분 무선(사) 기구개발팀 선행기구개발그룹  
 관심분야: Structural Optimization, Structural Analysis, CAD/CAE Integration



#### 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/자동차공학과 교수  
 관심분야: Structural Optimization, CAD/CAM/CAE, Simulation Based Design using Digital Images



#### 이 상 현

1986년 서울대학교 기계설계학과 학사  
 1998년 서울대학교 기계설계학과 석사  
 1993년 서울대학교 기계설계학과 박사  
 1993년~1995년 신도리코 기술연구소 책임연구원  
 1996년 대우 고등기술연구원 선임연구원  
 1996년~현재 국민대학교 교수  
 관심분야: CAD/CAM, 3D Geometric Modeling, Die & Mold Design, Automotive Design, Human-centered CAD