

# 구조 최적화를 위한 특징형상 재설계 알고리즘

박 상 근\*

한국교통대학교 기계공학과

## A Feature-based Reconstruction Algorithm for Structural Optimization

Sangkun Park\*

Department of Mechanical Engineering, Korea National University of Transportation, Daehak-ro 50, Chungju-si, Chungbuk 380-702, Korea

(Received 2014. 09. 18 / Accepted 2014. 11. 18)

**Abstract :** This paper examines feature-based reconstruction algorithm using feature-based modeling and based on topology optimization technology, which aims to achieve a minimal volume weight and to satisfy user-defined constraints such as stress, deformation related conditions. The finite element model after topology optimization allows us to remove some region of a solid model for predefined volume requirement. The stress or deformation distribution resulted from finite element analysis enables us to add some material to the solid model for a robust structure. For this purpose, we propose a feature-based redesign algorithm which inserts negative features to the solid model for material removal and positive features for material addition, and we introduce a bisection method which searches an optimal structure by iteratively applying the feature-based redesign algorithm. Several examples are considered to illustrate the proposed algorithms and to demonstrate the effectiveness of the present approach.

**Key words :** Feature-based modeling(특징형상기반 모델링), Structural optimization(구조 최적화), Topology optimization(위상 최적화)

### 1. 서 론

최근 기계 설계에 특징형상기반 솔리드 모델링 기법에 바탕을 둔 3차원 CAD 시스템이 제품 설계에 널리 확산되어 가고 있다. 그와 동시에 CAE 시스템을 사용한 해석 작업이 제품 설계의 기본적인 과정으로 자리를 잡아가고 있으며, 제품 설계 프로세스를 개선하기 위하여 CAD와 CAE가 보다 긴밀히 통합되어가고 있는 추세이다<sup>1-3)</sup>. 현재 CAD 모델로부터 유한요소 해석모델을 생성하는 과정은 부분적으로 자동화를 지원하는 상용 전처리 소프트웨어들이 제공되어 설계 프로세서의 시간을 단축할 수 있는 반면, 해석이나 최적 설계 결과를 CAD 모델에 반영하는 상용 소프트웨어

는 기능이 미약한 수준이다<sup>4-5)</sup>. 최근 상용 CAD 시스템에서 기본적인 구조해석이나 최적화 기능을 구비하여 자체적으로 설계 변경 내용을 CAD 모델에 반영할 수 있는 모듈을 발표하고 있으나 아직 현업에 적용할 만큼 검증받지 못하고 있는 실정이다. 또한 CAD 모델 수정을 설계자가 수작업으로 진행함으로써 상당한 시간을 들여 계산한 해석 결과를 제대로 CAD 모델에 반영하지 못하는 결과를 초래하고 이는 성능확인을 위한 시뮬레이션 반복수행으로 인하여 설계 프로세스 전체를 지연시키는 원인이 될 수 있다. 따라서 해석결과로부터 CAD 모델을 생성하는 과정을 부분적이라도 자동화 할 수 있다면 제품 설계에 있어서 시간 단축을 체계적으로 확보하게 된다. 본 연구에서는 CAD 모델로부터 이산화 된 해석 모델을 생성하고 구조해석 및 위상최적화를 통해 나온 이산화 된 결과물을 CAD

\*Corresponding author, E-mail: skpark@ut.ac.kr

모델로 재반영하기 위해 특징형상(feature)를 삽입하는 특징형상기반 재설계 알고리즘을 제시하고자 한다. 또한 이 알고리즘을 기반으로 다중구속을 가진 구조물의 무게 경량화 기법에 관해 제안하고자 한다.

연속체 구조물의 위상설계는 복합재료의 개념을 이용하여 1970년대부터 각각 독립적으로 여러 학자들에 의하여 연구되어 왔다. 특히 위상최적설계(topology optimization)<sup>4)</sup>의 경우에는 초기 모델의 크기나 형상뿐만 아니라 구조물이 갖고 있는 위상까지도 변하기 때문에 설계자가 그 결과를 해석하여 다시 모델링 한다. Bendose와 Kikuchi<sup>6)</sup>에 의해 제안된 균질화법을 이용한 위상최적설계의 경우에는 최적구조설계 문제를 최적재료분포문제로 변환하여 해석하였기 때문에 최적설계 결과가 각 유한요소의 밀도분포로 나오게 된다. Kumar와 Gossard<sup>7)</sup>는 토폴로지 이미지에서 형상을 추출하기 위해서 형상밀도함수(shape density function)을 정의하였으며, Lin과 Chao<sup>8)</sup>는 이미지 해석을 통하여 형상의 특성을 찾아내어 미리 정의된 원, 다각형 혹은 이들의 조합으로 이루어진 도형으로 형상을 단순화 하였다. 그러나 모든 형상을 일정하게 정의된 도형으로 정의하기 때문에 실제 형상과 많은 차이가 있으며 복잡한 형상은 표현할 수 없었다. 한편 Hsu<sup>9)</sup>는 등밀도선을 이용하여 형상을 추출하는 기법을 소개 하였는데 이런 경우에는 매끄러운 형상이 나오지 않기 때문에 주요한 특징점들을 추출해 낸 후 다시 형상 최적화 과정을 거쳐서 최종 형상을 추출하였다.

이동훈, 민승재<sup>10)</sup> 등은 위상 이미지와 같은 디지털 이미지에서 레이아웃을 형성하는 경계선을 추출해 내고 주로 그래픽 이미지에서 사용되었던 모폴로지(morphology) 기법을 위상 이미지에도 적용하여 바둑판 무늬나 불필요한 잡음을 제거하고 좀 더 부드러운 외형선으로 만들어 준 후 CAD 모델로 생성하였다. 이상현<sup>11)</sup>은 CAD와 CAE간의 통합방식을 제안하였는데, 이 방법은 동시공학적인 통합 모델링 환경을 제공하며 특징형상기반 설계, 비다양체 모델링, 다중해상도 솔리드 모델링, 그리고 새롭게 제안된 다중축약도 비다양체 모델링을 이용하여 설계모델과 해석모델들이 동시적이고 일관성 있게 수정되도록 하였다.

본 연구에서 제시하는 특징형상기반 재설계 방식은 구조물의 평균균성(mean compliance)의 최소화를 목적함수로 하는 위상최적화를 통해 사용자가 정의한 목표볼륨에 만족하는 기하형상을 도출하고 이를

CAD 모델에 반영하기 위해 음(-)특징형상을 삽입하며 허용응력 및 허용변위 등의 제한조건이 만족되지 않는다면 양(+)특징형상을 삽입하여 제한조건이 만족되게 CAD 모델을 수정한다. 결국 본 연구에서는 높은 강성을 가지면서 무게 경량화를 달성하기 위해 다음과 같이 최적화 문제를 정의하였고 구현 알고리즘을 개발하였다.

- 설계변수로는 새로운 특징형상의 삽입 및 특징형상의 형태, 위치, 방향으로 정의하였다.
- 제한조건으로는 허용 가능한 최대응력, 변위, 변형률 등으로 정의하였다.
- 설계 알고리즘은 특징형상 재설계 알고리즘, 고강도 무게 경량화 알고리즘으로 정의하였다.

## 2. 특징형상기반 재설계 알고리즘

### 2.1 알고리즘 소개 및 특징

본 연구에서 제안하는 특징형상기반 재설계 알고리즘은 Fig. 1과 같다. 알고리즘의 입력값을 살펴보면 다음과 같다.

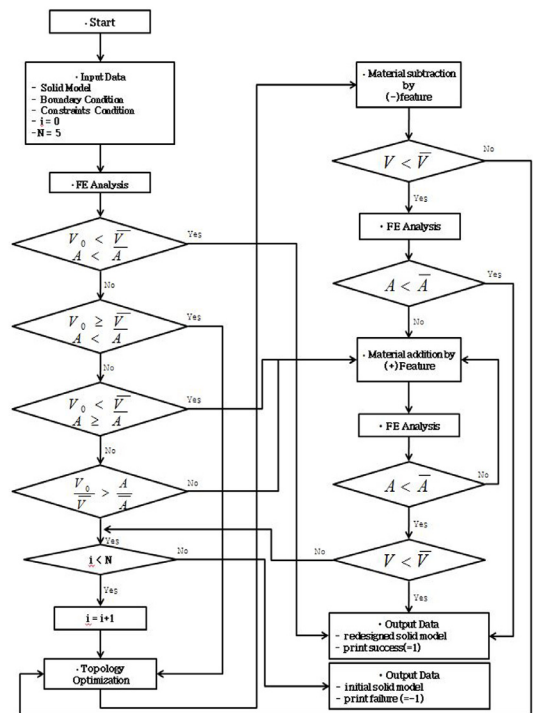


Fig. 1 Feature-based redesign algorithm.

- Feature-tree를 지닌 초기 solid model
- 구조물에 적용되는 경계조건
- 제한조건(volume 및 physics 제한조건으로 식(1~2)와 같다.

$$V < \bar{V} \tag{1}$$

$$A < \bar{A} \tag{2}$$

여기서,  $V$ 는 solid model의 체적,  $\bar{V}$ 는 사용자가 정의한 허용 가능한 최대체적,  $A$ 는 유한요소해석후의 응력 혹은 변위 등,  $\bar{A}$ 는 사용자가 정의한 허용 가능한 최대 응력 혹은 최대 변위 등이다.

- $i$ 는 반복수행회수로서 초기값(initial guess) 0으로  $N$ 은 최대 반복회수로서 본 연구에서는 값 5로 설정하였다.

입력값을 받은 초기 모델의 유한요소해석을 수행한 후, Table. 1에서 나타낸 총 4가지 경우를 판단하여 재설계 과정을 진행한다.

첫 번째 경우에는  $V_0 < \bar{V}$ ,  $A < \bar{A}$ 이 만족되면 초기 모델은 수렴으로 간주하고 알고리즘은 종료된다. 만족이 되지 않으면 두 번째 경우로  $V_0 \geq \bar{V}$ ,  $A < \bar{A}$ 를 확인한다. 사용자 정의의 physics제한조건은 만족하지만 초기 모델의 체적이 사용자 정의의 체적보다 크다면 (-)feature를 삽입하기 위한 위상 최적화를 수행하게 된다. 다음으로  $V_0 < \bar{V}$ ,  $A \geq \bar{A}$ 를 확인한다. 초기모델의 체적이 사용자 정의의 체적에 만족되지만 physics제한조건이 만족되지 않는다면 재료를 삽입하는 (+)feature과정에서 시작한다. 마지막으로  $V_0 \geq \bar{V}$ ,  $A \geq \bar{A}$ 인 경우 초기 모델의 체적과 physics제한조건 모두 만족되지 않는 것으로 식(3)의 판단여부에 따라 진행된다.

$$\frac{V_0}{\bar{V}} > \frac{A}{\bar{A}} \tag{3}$$

Table 1 Flow of the constraints condition

| Case                                   | Action                                    |
|--|---|
| $V_0 < \bar{V}$<br>$A < \bar{A}$       | Output data                               |
| $V_0 \geq \bar{V}$<br>$A < \bar{A}$    | Material removal by inserting (-)feature  |
| $V_0 < \bar{V}$<br>$A \geq \bar{A}$    | Material addition by inserting (+)feature |
| $V_0 \geq \bar{V}$<br>$A \geq \bar{A}$ | Material removal or addition              |

식(3)에 만족되면 체적제한조건비율이 physics제한 조건비율보다 크다고 판단하여 (-)feature를 삽입하고 만족되지 않으면 (+)feature 삽입과정에서 알고리즘이 시작된다.

알고리즘의 종료는 output data로 수렴과 발산 2가지 조건으로 구분된다.  $i < N$  조건이 만족되지 않으면 발산으로 판단하여 값 (-1)을 반환하며 알고리즘은 종료되고, 만족되면 수렴으로 간주하여 값 (+1)을 반환하며 동시에 재설계된 solid model을 출력한다.

## 2.2 목표볼륨 지향의 위상설계

본 연구는 구조물의 관심영역에 대해 위상최적화

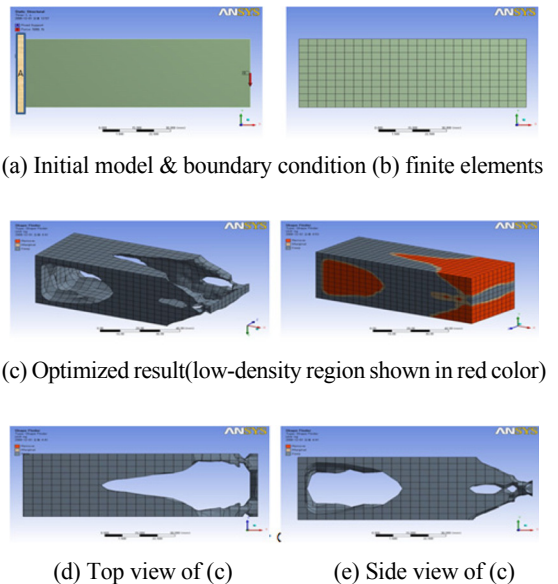


Fig. 2 Topology optimization result of cantilever.

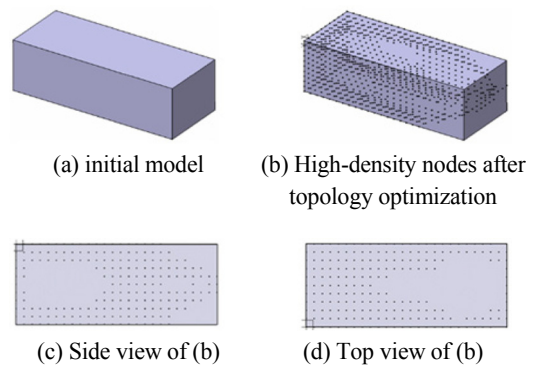


Fig. 3 Deletion of low-density nodes for topology design.

를 수행하여 모델 체적이 사용자가 정의한 목표에 도달할 때까지 밀도가 가장 작은 요소를 하나씩 삭제해 나가는 방식으로 위상을 도출하였다. 위상설계 과정의 한 예가 Fig. 2, Fig. 3에 있다.

외팔보의 초기형상이 정의되지 않은 상태라 가정하고, Fig. 2는 경계조건 및 외부하중만 알려진 상태에서 40%의 허용 가능한 재료만을 사용하여 최적의 외상을 도출한 형태이다. 위상최적화를 통해 구조물을 구성하는 각 요소(element)의 체적 및 밀도 분포 데이터를 추출하여 사용자가 정의한 목표볼륨( $\bar{V}$ )에 도달할 때까지 밀도가 가장 작은 요소를 하나씩 제거해 나가는 방식으로 체적제한조건  $V < \bar{V}$ 이 만족되게 한다. 이 과정을 저밀도 제거 볼륨과정이라고 명칭하겠다. Fig. 3은 저밀도 노드를 제거한 후에 살아남은 절점(node)들을 가시화한 결과이다. 목표볼륨, 제거볼륨 및 재료의 제거비율 간의 관계식을 정리하면 식(4~5)와 같다.

$$V = V_0 - \sum_{e=1}^n v_e, (e = 1, \dots, n) \quad (4)$$

$$\frac{V}{\bar{V}} - 1 \leq 0, (\bar{V} = V_0 - V_0 \times C) \quad (5)$$

여기서,  $V_0$ 는 초기 solid model의 체적,  $n$ 은 총 요소 수,  $v_e$ 는 저밀도 제거요소의 체적,  $C$ 는 재료의 제거비율이다. 이 과정이 종료되면 (-)feature 삽입과정으로 진행되며 구조물의 체적이 감소해 나간다. 여기서 감소되는 구조물은 여전히 특징형상으로 이루어진 solid 구조이다.

### 2.3 음(-)특징형상의 삽입

목표볼륨 지향의 위상설계를 통해 초기 해석모델에서 체적제한조건에 맞는 유한요소모델을 생성하였다면 모델을 구성하는 각 특징형상에 대하여 (-)feature 삽입과정을 수행하게 된다. Fig. 4는 임의의 특징형상 1개에 대해 (-)feature 삽입을 위한 3가지 경우를 보여주고 있다.

Fig. 4에서  $V_r$ 는 특징형상 내부에 존재하는 저밀도 제거볼륨을 감싸는 직육면체 형태의 최대 크기박스(minmax box)의 체적,  $V_f$ 는 solid model 내부에 존재하는 임의의 한 특징형상의 체적이다.  $V_r/V_f \times 100$ 을 계산하여 5% 미만인 경우, case(a)와 같다면 특징형상을

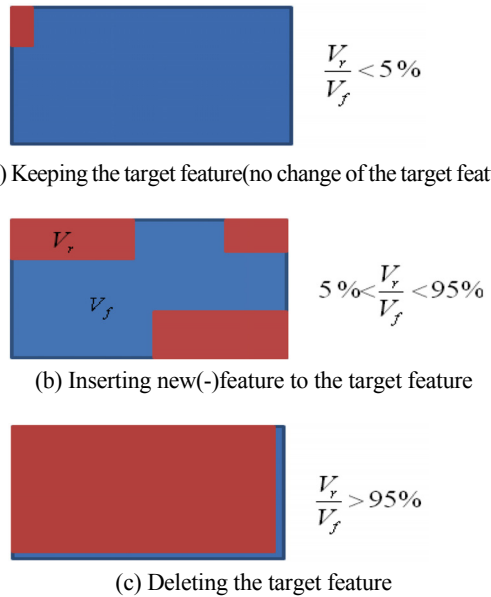
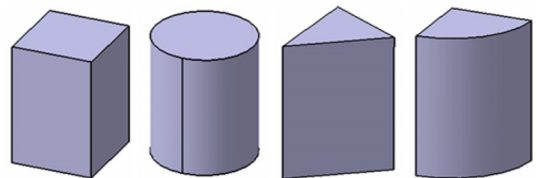


Fig. 4. Three cases for an insertion of (-)feature

수정없이 그대로 유지한다. case(b)와 같이 5~95%인 경우라면 최대크기박스(다수개가 서로 분리되어 존재할 수 있음)에 해당하는 (-)feature를 삽입한다. case(c)와 같이 95% 이상인 경우 특징형상 자체를 삭제한다. 여기서 case(a), (b), (c)에 적용된 값은 사용자가 설정할 수 있다. 그리고 case(a), case(c)의 존재이유는 미소한 값의 차이로 (-)feature가 삽입되면 형상변화에 따른 해석시간의 증가와 제조측면에서 제조시간 및 비용이 증가함으로 삽입이 적당하지 않다고 판단하기 때문이다.

(-)feature의 삽입조건이 결정되면, Fig. 5에 제시된 기본 특징형상들을 (-)feature의 자격으로 삽입된다. 기본 특징형상을 4가지 경우로만 적용한 것은 제조적인 측면을 고려한 경우로 spline 형상은 배제하였다. 또, 위상적인 측면에서만 고려하였기 때문에 기본 특징형



(a) Hexahedron (b) Cylinder (c) Pentahedron (d) 3/4 Cylinder  
Fig. 5. Primitive feature

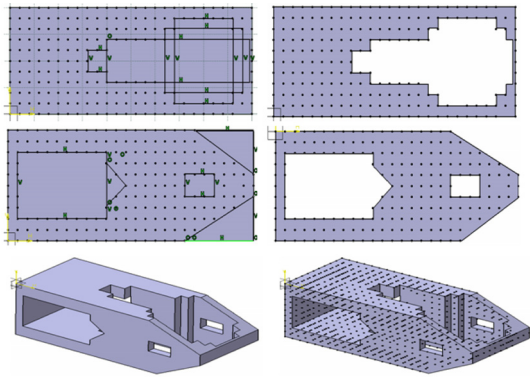


Fig. 6. Insertion process of (-)feature

상의 치수 파라미터는 향후 연구과제로서 치수 최적화에서 해결하기로 하였다.

이 기본 특징형상들은 저밀도 제거볼륨 데이터를 바탕으로 생성된다. Boolean operations의 removal 기능을 사용하여 초기 모델의 feature-tree는 변경되지 않은 상태에서 새로운 (-)feature의 삽입으로 체적을 줄인다. 이 과정은 Fig. 6과 같다. 여기서 모서리 진 부분이나 각이 진 부분에 fillet을 넣어줌으로써 응력집중현상을 막는다. 마지막 단계로는 (-)feature의 삽입으로 체적이 줄어든 변경 solid model을 체적제한조건에 만족하는지 확인을 한다. 식(4~5)를 통해 수치적으로는 체적제한조건에 만족이 되었지만 기본 특징형상의 단순한 형상을 삽입함으로 인해 오차 값이 발생하므로 확인 과정을 거친다. 체적제한조건에 만족되지 않는다면 2.2절로 되돌아가며 체적제한조건에 만족될 때까지 반복 수행된다. 만족된다면 유한요소해석(FEA)이 수행되고 physics 제한조건을 검토한다. 사용자 정의의 응력, 변형률, 변위 등이 만족한다면 알고리즘은 종료되고 그렇지 않다면 2.4절의 (+)feature의 삽입과정으로 진행된다.

#### 2.4 양(+)특징형상의 삽입

(+)feature는 음(-)특징형상의 삽입으로 생성된 solid model이 physics제한조건에 만족되지 않으면 삽입되는 과정이다. (+)feature가 삽입되면 체적은 증가하지만 physics제한조건에 부합되게 solid model의 구조를 변경하는 것이다. Physics 제한조건은 식(6-9)와 같다.

$$\frac{\sigma}{\bar{\sigma}} - 1 \leq 0 \quad (6)$$

$$\frac{|u|}{\bar{u}} - 1 \leq 0 \quad (7)$$

$$\frac{\epsilon}{\bar{\epsilon}} - 1 \leq 0 \quad (8)$$

$$\frac{s_n}{\bar{s}_n} - 1 \leq 0 \quad (9)$$

여기서,  $\sigma$ 는 FEA 후 도출된 최대 von-mises 응력,  $\bar{\sigma}$ 는 안전계수를 고려한 허용응력,  $|u|$ 는 FEA후 도출된 최대 변위,  $\bar{u}$ 는 허용변위,  $\epsilon$ 는 FEA 후 도출된 최대 von-mises 변형률,  $\bar{\epsilon}$ 는 허용변형률,  $s_n$ 는 유한요소 해석 후 도출된 피로안전계수,  $\bar{s}_n$ 는 허용피로안전계수이다. (+)feature의 삽입에서 특징형상의 크기(size), 형태(type)는 배제된 상태에서 특징형상이 삽입되는 위치에 따라 구조물의 안전성은 변경된다. 본 연구에서는 설계자의 의도에 따라 결과값이 변경되는 현상을 방지하고 정형화된 (+)feature의 삽입을 위해 다음과 같이 삽입 위치를 제안하고자 한다.

- (1) Solid model의 경계면에 (+)feature를 삽입하는데, 경계조건이 고정구속인 부위 근처 즉, 고정영역이 확대되게 위치시킨다. 보강대의 원리이기도 하다. 여기서, (+)feature의 방향은 변위벡터와 평행한 방향으로 위치시킨다.
- (2) 고정구속이 없는 경우는 다음과 같다.

$$\gamma_\sigma = \frac{\sigma}{\bar{\sigma}}, \gamma_u = \frac{|u|}{\bar{u}}, \gamma_\epsilon = \frac{\epsilon}{\bar{\epsilon}} \quad (10)$$

식(10)의  $\gamma_\sigma, \gamma_u, \gamma_\epsilon$ 를 검토한 후 이들 중 가장 큰 값이 나타나는 부위에 (+)feature를 삽입하고 physics제한조건을 확인한다. 만족되지 않으면 (1), (2)의 과정을 거쳐 physics제한조건이 만족될 때까지 반복 수행된다. 이 과정 수행 후 체적제한조건의 여부를 다시 확인하는데, 만족이 되면 알고리즘은 종료되고 만족되지 않으면 2.2절의 목표볼륨 지향의 위상설계과정으로 돌아간다.

### 3. 다중구속을 가진 구조물의 무게 경량화

#### 3.1 최적화 문제정의

최적설계란 설계대상물 유용성과 안전성을 확보하면서 최소의 재료를 사용하여 최대의 효과를 달성할 수 있도록 그 구조물의 치수와 기하학적 형상 등의 파

라미터(parameter)를 결정하는 것이라 정의 할 수 있고, 수학적 관점에서는 주어진 제한조건을 만족하는 설계변수 중에서 목적함수를 최소 또는 최대화하는 값을 찾는 것이라 말할 수 있으며, 이를 정식화하면 다음과 같다.

Find  $x$  (11)

Minimize  $f(x)$  (12)

Subject to

$h_i(x) = 0, i = 1, \dots, l$  (13)

$g_j(x) = 0, j = 1, \dots, m$  (14)

$x^L < x < x^U$  (15)

본 연구의 목표는 구조물의 무게 경량화이므로 목적함수는 식(16)과 같이 계산의 편의상 구조물의 체적으로 하였다. 그리고 제한조건으로는 식(5~8)과 같이 응력, 변위, 변형률 및 위상설계에서 사용하는 체적제한조건 등을 부등식 제한조건으로 설정하였다.

Minimize  $V = V_0 + \Sigma V_{(+)}f - \Sigma V_{(-)}f$  (16)

여기서,  $V_{(+)}f$ 는 삽입하는 (+)feature의 체적,  $V_{(-)}f$ 는 삽입하는 (-)feature의 체적이고 설계변수는 새로운 특징형상의 삽입으로 피처를 정의하는 모든 파라미터가 포함된다. 즉, 특징형상의 형태(type), 위치(position), 방향(orientation), 치수(size)가 있고, 여기서 형태는 2.3절에 언급한 기본 특징형상에서 선택한다. 위치와 방향도 위에서 언급된 (-)(+)feature에 의존하여 결정된다.

### 3.2 설계 알고리즘

본 연구에서는 특징형상기반 재설계 알고리즘을 사용하여 사용자가 설정한 목표볼륨을 갖도록 구조물을 모델링하는 함수로 활용하여 점차 목표볼륨을 낮추어 결국 최소 무게의 구조물을 찾아내는 알고리즘을 제시하고자 한다. 본 연구에서 사용한 기법은 bisection 방법

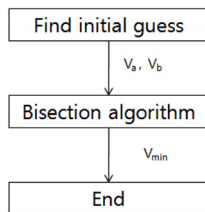
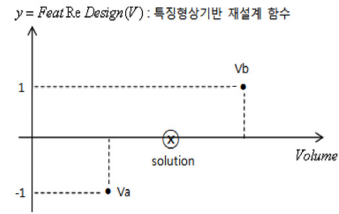


Fig. 7. Bisection algorithm for minimize volume



(a) Initial guess

```

Given Va, Ub, Utol, N
// Utol : 최대 허용가능 체적 변화량
// N : 최대 반복회수
set i=1
while(i<=N)
{
  set U=Va+(Ub-Va)/2
  if((Ub-Va)/2<Utol)
  {
    output("solution is U")
    end
  }
  set i=i+1
  set Fa=FeatReDesign(Ua)
  set Fb=FeatReDesign(Ub)
  if(Fa>Fb)
  {
    set Va=U
  }
  else
  {
    set Ub=U
  }
}
output("algorithm failed")
end
    
```

(b) Pseudo-codes

Fig. 8. Bisection algorithm for finding a minimal volume

으로 Fig. 7과 같으며 Fig.8 (a)에서 Vb는.특징형상기반 재설계 알고리즘(그림에서 FeatReDesign()함수)에 의해 성공한 경우의 모델 체적이고 반환값(y)이 1이다. Va는 실패한 경우의 모델 체적으로 반환값이 -1이다. 이러한 Va와 Vb를 Bisection algorithm의 초기치로 사용하여 해를 계산한다.

## 4. 적용예제

본 연구에서 제시한 방식으로 구조물의 경량화를 수행하기 위해 자동차의 현가장치로 사용되는 double wishbone type suspension의 로어 컨트롤 암(lower control arm)을 적용 예제로서 본 방식을 테스트하였다. 한편, (-)(+)feature의 삽입과 최적화 및 유한요소해석을 위해 CATIA V5, ANSYS Workbench, ANSYS Classic을 사용하였다.

로어 컨트롤 암의 초기모델에 관해 주어진 요구조건을 만족시킴과 동시에 구조경량화를 위한 최적화 문제정의는 다음과 같다.

Minimize Total Volume (17)  
Subject to

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_x} - 1 \leq 0, \frac{\sigma_y}{\sigma_y} - 1 \leq 0 \quad (18)$$

$$\frac{V}{\bar{V}} - 1 \leq 0 \quad (19)$$

최적화 해석을 위한 조건으로 목적함수를 로어 컨트롤 암의 중량 최소화로 정의하였고, 제한조건으로는 식(18~19)처럼 X방향의 허용응력 112.5Mpa, Y방향의 허용응력 96Mpa, 위상 최적화 시 허용하는 재료의 양은 체적제한조건으로  $\bar{V} = V_0 \times 0.7$ 로 정의하였다. 특징형상 재설계 알고리즘을 수행하기 위해 feature-tree를 지닌 solid model과 하중 및 경계조건은 Fig. 9와 같다. Table. 2는 로어 컨트롤 암의 재료 물성치이다.

로어 컨트롤 암의 초기모델을 유한요소 해석한 결과  $V_0 \geq \bar{V}$ ,  $A < \bar{A}$ 인 경우로 2.2절의 목표볼륨 지향의 위상설계를 수행하였고,  $V_r/V_f = 32\%$ 이므로 Fig. 10과 같이 (-)feature를 삽입하였다.

(-)feature의 삽입으로 감소된 모델 체적은 초기 모

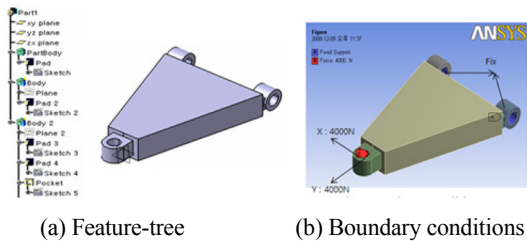


Fig. 9. Feature-tree and boundary condition of lower control arm

Table. 2 Material properties of lower control arm(AL6061)

|                             |                            |
|-----------------------------|----------------------------|
| Young's Modulus             | 7.14e+11 pa                |
| Poisson's Ratio             | 0.33                       |
| Density                     | 2.66e-6 kg/mm <sup>3</sup> |
| Tensile Strength Yield      | 2.7e+008pa                 |
| Compressive Strength, Yield | 2.9e+008pa                 |

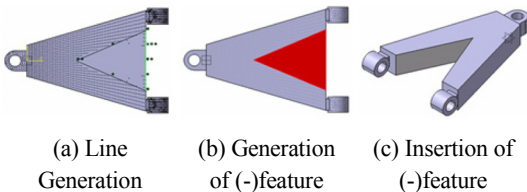
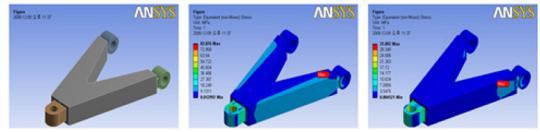


Fig. 10. Material removal by inserting (-)feature to lower control arm model

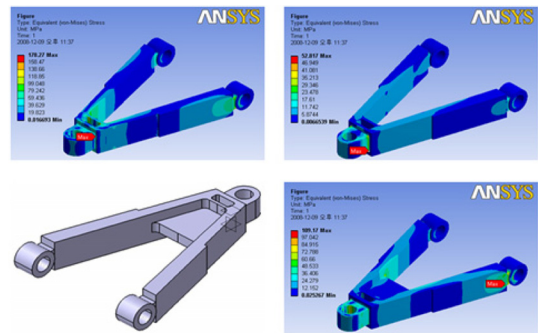


(a) Solid model (b)  $\sigma_x$  distribution (c)  $\sigma_y$  distribution

|                           | Fig. 10 model (initial model) | Model after 1st (-)feature insertion | Model after 2nd (-)feature insertion |
|---------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Volume (mm <sup>3</sup> ) | 3.825e+5                      | 2.767e+5                             | 2.533e+5                             |
| Mass(kg)                  | 1.02                          | 0.74                                 | 0.67                                 |
| $\sigma_x$ (Mpa)          | 90.723                        |                                      | 82.076                               |
| $\sigma_y$ (Mpa)          | 33.637                        |                                      | 31.892                               |

Fig. 11. FE analysis after (-)feature insertion

델의 위상최적화 시 설정한 체적제한조건에 부합되지 않아 저밀도 제거블록 작업을 재수행 하였다. 결국 2번의 반복수행으로 Fig. 11과 같이 체적 및 응력제한조건 모두를 만족하는 결과를 도출하였다. 위에서 도출된 결과는 초기 모델의 재료를 70%만 사용한다는 체적제한조건을 가지고 수행한 경우이다. 3.2절에 제시한 bisection algorithm에 의해 무게 최소화를 도출하기 위하여 Fig. 11에서 나온 모델을 가지고 특징형상 재설계 알고리즘을 재수행 하였다. 체적제한조건만 60%로 변경하였고 나머지 조건들은 동일시 하였다. 그 결과 (-)feature 삽입 후 체적제한조건은 만족하였지만, 응력제한조건에서  $\sigma_x = 178$  Mpa로 허용응력( $\bar{\sigma}_x$ ) =



|                           | Fig. 11 (a) model | Model after 1st (-)feature insertion | Model after 1st (+)feature insertion |
|---------------------------|-------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Volume (mm <sup>3</sup> ) | 2.533e+5          | 1.137e+5                             | 1.305e+5                             |
| Mass (kg)                 | 0.67              | 0.3                                  | 0.35                                 |
| $\sigma_x$ (MPa)          | 82.076            | 178.27                               | 109.17                               |
| $\sigma_y$ (MPa)          | 31.892            | 52.817                               | 50.379                               |

Fig. 12 FE analysis after (+)feature insertion

112.5.Mpa을 초과하였다. 응력제한조건에 만족되지 않음으로 2.4절에 제시한 (+)feature가 삽입되었고 그 결과 Fig. 12와 같이 체적 및 응력제한조건 모두 만족 되는 결과를 도출하였다.

본 연구에서 제시한 특징형상기반 재설계 알고리즘의 반복적용을 통해 제한조건에 만족하는 2개의 solid model이 도출되었고 초기 모델체적을 65%이상 감소시켰다. 하지만 3.2절에서 제안한 설계 알고리즘의 초기값(initial guess)을 찾기 위해서는 또 한번 특징형상기반 재설계 알고리즘을 수행해야 한다. 체적제한조건은 Fig. 12에서 도출된 구조물의 허용 가능한 재료 80%를 사용하여 적용하였고, 이와 마찬가지로 나머지 조건들은 동일시하였다.

결과는 Fig. 13와 같다.  $\sigma_x$ 가 응력제한조건에서 1% 정도의 초과된 값이 도출되었지만 발생범위가 한 곳의 절점에서 응력집중현상이 발생한 경우이고, 응력집중 현상이 발생한 절점을 제외한 전체 구조물의 von-mises stress는 96.78Mpa로 나타났다. Fig. 14의 결과를 토대로 허용재료 70%만을 사용하여 특징형상기반 재설계 알고리즘을 실행한 결과, 반복회수가 최대 반복회수(본 연구에서는 5회)에 도달하여, 사용자가 정의한 제한조건을 만족하는 구조물을 생성할 수 없음을 확인하였다. 허용재료를 80% 적용하였을 경우도 수렴되지 않았고, 허용재료를 90% 사용할 경우  $V_r/V_f=4.2\%$ 값이 도출되어 2.3절에 제시한 case(a)의 경우로 해석시간 및 제조적인 측면에서 제외하기로 하였다.

따라서 본 연구에서는 3번째로 제안한 모델을 lower control arm의 최적모델로 선출하였다. 초기 모델의 체

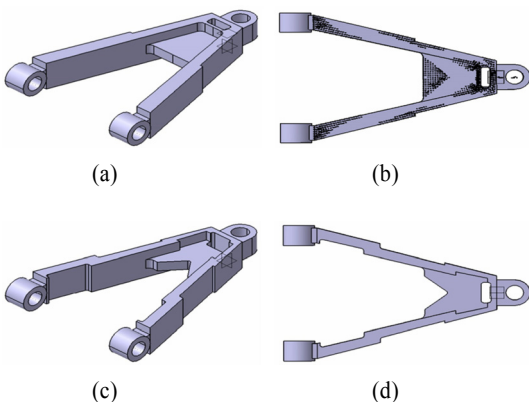
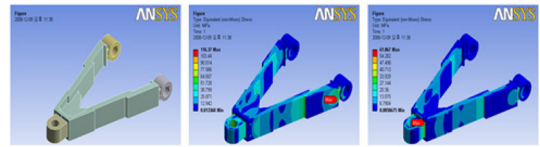


Fig. 13. Material removal by inserting (-)feature to solid model shown in Fig. 12



(a) Solid model (b)  $\sigma_x$  distribution (c)  $\sigma_y$  distribution

|                           | Fig. 13 (a) model | Model after 1st (-)feature insertion |
|---------------------------|-------------------|--------------------------------------|
| Volume (mm <sup>3</sup> ) | 1.305e+5          | 99,098                               |
| Mass (kg)                 | 0.35              | 0.26                                 |
| $\sigma_x$ (MPa)          | 109.17            | 116.37                               |
| $\sigma_y$ (MPa)          | 50.379            | 61.067                               |

Fig. 14. FE analysis of solid model shown in Fig. 13

Table. 3 Summary lower control arm analysis for achieving a minimal volume

|                           | Initial model Fig. 10 | Model in Fig. 11 | Model in Fig. 12 | Model in Fig. 14 |
|---------------------------|-----------------------|------------------|------------------|------------------|
| Volume (mm <sup>3</sup> ) | 3.825e+5              | 2.533e+5         | 1.30e+5          | 0.99e+5          |
| Mass(kg)                  | 1.02                  | 0.67             | 0.35             | 0.26             |
| $\sigma_x$ (MPa)          | 90.723                | 82.076           | 109.17           | 116.37           |
| $\sigma_y$ (MPa)          | 33.637                | 31.892           | 50.379           | 61.067           |

적보다 약 75%정도 감소하였고, 응력은 약 11%의 증가가 나타났지만 사용자 정의의 허용응력을 초과하지 않았다. 참고로 X, Y방향에 대한 안전계수는 약 2.6, 4.7로 나타났다. 이상의 결과를 정리하면 Table. 3과 같다.

### 5. 결론

본 연구에서는 CAD 모델로부터 이산화 된 해석모델을 생성하고 구조해석 및 위상최적화를 통해 나온 이산화 된 결과물을 CAD 모델로 재반영하기 위해 음(-)특징형상, 양(+)-특징형상을 삽입하는 특징형상 재설계 알고리즘을 제시하였고, 또한 이 알고리즘을 바탕으로 다중구속을 가진 구조물의 무게 경량화 기법을 제시하였다. 본 연구에서 제시된 방식의 특징을 살펴보면 다음과 같다.

- 위상최적화 분야에서 지금까지 연구되고 있는 CAD 모델화 과정은 최적화 결과물에서 단면곡선 추출 후 loft기능으로 기하학적 형상만을 추출 하였으나(입력 : solid model, 출력 : 경계곡면) 본 연구는



특징형상을 기반으로 solid 자료 구조를 직접 다루기 때문에 최종 결과 역시 feature로 정의된 solid 구조가 유지된다.

- 기존의 위상최적화 연구들은 초기모델에서 체적을 제거해 나가는 단일방향의 방식이었으나 본 연구는 초기 제안된 모델이 불안한 경우라도 체적을 더해 줌으로써 구조물의 안전성을 높여줄 수 있기 때문에 양방향(즉 (+)방향 및 (-)방향)을 지원할 수 있다.
- 본 연구 방식은 특징형상의 삽입을 통하여 모델 변경을 유도하기 때문에 복잡한 피처로 이루어진 구조물이나 조립된 구조물까지 모두 적용될 수 있다.
- 특징형상 삽입 시 기본 특징형상들을 사용하기 때문에 추후 일어나는 가공 및 제조측면에서 비용 및 시간을 최소화 하였다고 말할 수 있다.
- 향후 과제로서 본 연구 방식에 의해 도출된 구조물에 대해 치수최적화(size optimization)가 필요하다. 즉, 특징형상을 정의하는 파라미터들을 설계변수로 선택하고 본 연구에서 소개한 무게 최소화를 목적함수로 설정한 후, 기존의 최적화 기법을 사용하여 최적해를 찾는 것이다. 더불어 보다 빠른 결과 도출을 위해 근사최적화 기법에 관한 연구가 필요하다. 또한 강건설계를 고려하여 구조물을 재설계하는 설계 알고리즘의 개발이 필요하다.

### Acknowledgement

이 논문은 2014년도 한국교통대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임

### References

- 1) C. G. Armstrong, "Modelling requirements for finite element analysis," *Computer-Aided Design*, Vol. 26, No. 7, pp. 573-578, 1994.
- 2) T. De Martino, B. Falcidieno, and S. Hassinger, "Design and engineering process integration through a multiple view intermediate modeller in a distributed object-oriented system environment," *Computer-Aided Design*, Vol. 30, No. 6, pp. 437-452, 1998.
- 3) S. Gordon, "An Analyst's View: STEP-Enabled CAD/CAE Integration," In: presentation materials of NASA's STEP for Aerospace Workshop, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, January 16-19, 2001.
- 4) N. Olhoff, M. P. Bendsoe, and J. Rasmussen, "On CAD-integrated structural topology and design optimization," *Computer Method in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.89, No. 1/3, pp. 259-279, 1991.
- 5) H. Langer, T. Puhlhofer, and H. Baier, "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.
- 6) M. P. Bendsoe and N. Kikuchi, "Generating Optimal Topologies for Structural Design Using a Homogenization Method," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 71, pp. 197-224, 1988.
- 7) A. D. Kumar and D. C. Gossard, "Synthesis of Optimal Shape and Topology of Structures," *Transaction of the ASME*, Vol. 118, pp. 68-74, 1996.
- 8) C. Y. Lin, and L. S. Chao, "Automated image interpretation for integrated topology and shape optimization," *Structural Multidisciplinary Optimization*, Vol. 20, pp. 125-137, 2000.
- 9) Y. L. Hsu, M. S. Hsu, and C. T. Chen, "Interpreting results form topology optimization using density contours," *Computer and Structures*, Vol. 79, pp. 1049-1058, 2001.
- 10) 이동훈, 민승재, "토폴로지 이미지를 이용한 CAD 모델 구축," *대한기계학회논문집(A) 제27권 제11호*, pp. 1925-1932, 2003.
- 11) 이상현, "특징형상기반 다중축약도 비다양체 모델링 기법을 이용한 CAD-CAE 통합", *한국 CAD/CAM 학회 학술발표회 논문집*, pp. 364-372, 2006.