

순차설계영역을 이용한 근사 형상최적에 관한 연구

Approximate Shape Optimization Technique by Sequential Design Domain

임 오 강†

Lim, O-Kaung

김 우 현*

Kim, Woo-Hyun

(논문접수일 : 2003년 7월 25일 ; 심사종료일 : 2004년 2월 2일)

요 지

기계부품의 설계는 초기 설계, 해석, 성능 평가의 반복 과정을 통하여 수행된다. 설계자는 각 과정에서 특성에 맞는 프로그램을 사용하고 있다. 본 연구에서는 순차 설계 영역을 이용한 형상최적화를 수행하였다. 순차 설계영역의 근사함수를 구하기 위하여 Pro/Engineer 와 ANSYS 실행의 자동화를 수행하였다. 전체 설계영역을 근사식으로 표현하기에는 어려움이 있다. 정확도가 높은 근사식을 만들기 위하여 순차설계영역을 설정하여 각 단계에서 수렴한 해로 이동량을 결정하고, 두 번 연속하여 순차설계 영역에 존재하면 수렴조건을 만족하는 것으로 하였다. 각 단계의 해는 순차이차 계획법인 PLBA(Pshenichny-Lim-Belegundu-Arora)알고리즘을 이용하여 구하였다.

핵심용어 : 반응표면법, 직교배열표, 순차설계영역, 이동량제한

Abstract

Mechanical design process is generally accomplished by design, analysis, and test. Designers use programs fitting purpose, and obtain repeatedly a response of a simulation program, a sub-program for optimization. In this paper, shape optimization using approximate optimization technique is carried out with sequential design domain(SDD). In addition, algorithm executing Pro/Engineer and ANSYS automatically are adopted in the approximate optimization program by SDD. It is difficult for design problem to be approximated accurately for the whole range of design space. However, more or less accurate approximation is constructed if SDD is applied to that case. SDD starts with a certain range, which is off-seted from midpoint of an initial design domain and then SDD of the next step is determined by a move limited. Convergence criterion is defined such that optimal point must be located within SDD during the two steps. Also, the PLBA(Pshenichny-Lim-Belegundu-Arora) algorithm is used to solve approximate optimization problems. This algorithm uses the second-order information and the active set strategy, in order to seek the direction of design variables.

keywords : response surface methodology, tables of orthogonal arrays, sequential design domain, move limit

1. 서 론

작업환경에 따라 발생하는 제한조건을 만족하며 우수한 성능을 가지도록 기계부품을 설계하여야 한다. 이런 설계를 위하여 최적설계가 발전하였으며, 그 방식에 따라 치수 최적설계와 형상 최적설계가 있다. 치수 최적설계는 보의 지름이나 단면적, 판의 두께 등과 같은 부품단면을 설계변

수로 하여 설계하는 것이며 형상최적설계는 필렛, 댐 등과 같이 부품의 형상을 설계변수로 하여 최적설계를 수행하는 것이다. 일반적으로 최적설계과정은 초기 설계, 해석, 성능 평가의 반복 과정을 통하여 이루어진다. 이 과정에서 설계자들은 문제의 특성에 적합한 프로그램을 사용하고 있다. 예를 들면 제품의 모델링 과정에서는 Pro/Engineer 혹은 CATIA 같은 CAD 소프트웨어를 사용하고, 문제의 물리적

† 책임저자, 정회원 · 부산대학교 기계공학부 기계기술연구소 교수
전화:051-510-2306; Fax:051-582-9164

E-mail:okim@pusan.ac.kr

* 부산대학교 기계설계공학과 석사

* 이 논문에 대한 토론을 2004년 6월 30일까지 본 학회에 보내주
시면 2004년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

특성에 맞는 해석 프로그램을 사용하고 있다. 최적설계문제는 응력이나 변위와 같은 시스템의 응답량을 제한하는 제약조건과 제품의 성능을 최대, 최소화하는 목적함수로 구성된다. 최적설계문제의 제약조건과 성능지수는 시스템 해석프로그램을 반복적으로 사용하여 응답량을 구하고 최적알고리즘을 이용하고 최적해를 구한다.

다분야 통합최적설계나 대형최적설계문제의 경우에는 계산량이 많으므로 이를 효과적으로 해석하기 위하여 분산 최적설계 방법의 연구가 발전하였다. 분산 최적설계에서는 각 과정에서 요구되는 해석프로그램의 자동실행이 필요하다. 또한 해석한 결과를 최적화 알고리즘에 직접 적용시킬 때에는 이론적으로 어려우며 많은 해석시간이 요구된다.¹⁾ 이러한 문제를 해결하기 위해 반응표면법을 이용한 근사적 방법을 이용한다. 반응표면법은 관심 있는 반응이 여러 설계변수들에 의해 영향을 받을 때 설계변수에 대하여 반응표면을 근사 모델링 하고 해석하기 위한 유용한 수학적, 통계적 기술들의 집합을 말한다.²⁾ 그러나 시스템의 응답량을 근사식으로 표현함에 있어 많은 오차가 있다. 고차항을 사용하면 근사식의 오차를 줄일 수 있으나, 많은 실험점과 복잡한 계산이 필요하다. 또한 설계영역이 커질 경우에는 고차의 근사식을 사용하더라도 정확도가 떨어진다.³⁾ 즉 근사식이 지나는 정확도의 한계성 때문에 근사 최적문제는 한번의 단계에서 최적해에 수렴하지 않고, 수렴하더라도 많은 오차를 가지고 있다.⁴⁾ 본 연구에서는 좁은 설계영역인 순차 설계영역을 소개하고, 저차항의 근사식으로 시스템의 응답량을 표현하기 위해서 순차 설계의 개념을 도입하였다.⁵⁾ 순차설계영역은 설계변수의 초기값의 10%에 해당하는 값을 설계변수의 변화량으로 주어 각 설계변수를 상·하로 변화시켜 구하였다. 각 설계변수의 차수 차에 따른 값을 조절하기 위하여 자연로그함수를 사용하여 차수 차이를 조절하였다. 순차 설계개념을 형상최적화에 적용하기 위하여 이동량 조절을 제안하였다. 각 단계에서의 수렴해가 다음 단계의 초기값을 사용하는 순차 설계에서 보다 안정적인 수렴성을 확보하기 위하여 이동량을 조절하였다.

근사식을 구성할 때 시스템의 응답량을 통계적인 실험방법을 이용하면 최적의 실험점으로 정확도가 높은 근사식을 구할 수 있다. 본 연구에서는 몇 가지 통계적인 실험 방법을 소개하고, 설계변수가 많을 경우에 유리하며 각 설계변수에 대해 동일 한 영향력을 가지는 직교배열표(orthogonal array)를 주로 사용하였다.

본 연구에서는 모델링 프로그램과 해석프로그램을 연속적으로 연결시키기 위하여 텍스트 형태의 Pro/Engineer의 추적 파일⁶⁾과 ANSYS의 매크로파일⁷⁾을 사용하였다. 텍스트 형태의 모듈 사용으로 정보의 전달이 용이하고, 사

용자가 쉽게 제어할 있다. 각 단계에서 형상의 구현방법으로 절점의 좌표를 이동하여 수행하는 방법과 특정부위의 형상의 스프라인곡선을 설계변수로 하여 최적설계를 수행하는 두 가지 방법이 있다. 본 연구에서는 후자의 방법을 사용하였다. 목적함수는 1차식의 근사식을 사용하였고, 제약조건은 1차 역함수를 사용하였다. 각 단계에서의 수렴해 PLBA(Pshenichny-Lim-Belegundu-Arora)알고리즘⁸⁾을 사용하여 해를 구하였다. 구하여진 해에 의해서 각 단계의 이동량이 정해지고, 이동량이 연속하여 순차 설계영역에 존재하면 최적해로 간주하였다.

2. 상용프로그램간의 인터페이스

2.1 근사 함수 및 실험 방법

최소자승법⁹⁾은 반응표면법에서 어떤 시스템의 성능을 나타내는 회귀 모델의 회귀 계수를 추정하는데 일반적으로 사용된다. n 개의 관찰점과 k 개의 설계변수사이의 관계가 $n > k$ 일 때, 표 1과 같은 종속변수와 독립변수 사이에 다음과 같은 관계식으로 나타난다. x_{ij} 는 i 번째 실험점에 대한 j 번째 회귀 변수이다.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik} + \epsilon_i \quad (1)$$

$$= \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} + \epsilon_i, \quad i=1, 2, \dots, n$$

n 개의 관찰점을 동시에 나타내기 위한 행렬표현식은 다음과 같다.

$$y = X\beta + \epsilon \quad (2)$$

여기서,

$$y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_n]^T$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix}$$

$$\beta = [\beta_0 \ \beta_1 \ \dots \ \beta_k]^T$$

$$\epsilon = [\epsilon_1 \ \epsilon_2 \ \dots \ \epsilon_n]^T$$

계수벡터 β 는 다음과 같은 최소 자승 함수를 최소화함으로써 구하여진다.

$$L = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \epsilon^T \epsilon = (y - X\beta)^T (y - X\beta) \quad (3)$$

식 (3)은 다음 식과 같이 표현된다.

$$L = y^T y - 2\beta^T X^T y + \beta^T X^T X \beta \quad (4)$$

표 1 Data for multiple linear regression

y	x_1	x_2	\dots	x_k
y_1	x_{11}	x_{12}	\dots	x_{1k}
y_2	x_{21}	x_{22}	\dots	x_{2k}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
y_n	x_{n1}	x_{n2}	\dots	x_{nk}

계수벡터 β 에 대해 식 (4)의 최소 자승 함수를 편미분 하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial L}{\partial \beta} \Big|_b = -2 X^T y + 2 X^T X b = 0 \quad (5)$$

β 의 최소자승 추정치 b 는 다음 식과 같다.

$$b = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (6)$$

따라서 근사회귀 모델은 다음과 같다.

$$\hat{y} = Xb \quad (7)$$

실험계획법은 설계영역 내에서 근사식을 구성하는데, 필요한 실험점의 위치와 실험점의 개수를 결정하는 체계적인 방법이다. 반응 표면 법에서 실험점들의 선택은 반응표면의 근사화의 정확도와 비용에 중요한 영향을 준다. 식 (6)의 b 를 결정하기 위해서는 적절한 위치에서 구조해석을 수행하여야 한다.¹⁰⁾ 본 연구에서는 모든 열에 대하여 각 변수들의 균형을 맞추어 놓은 직교배열표를 이용한 실험방법을 사용하였다. 직교배열표에는 2, 3, 4, 5 수준계와 혼합수준계 등이 있으나, 본 연구에서 이용되는 3수준 직교배열표는 다음의 규칙을 따른다.

$$L_{3^m} (3^{(3^m-1)/2})$$

여기서 m 은 2이상의 정수이고, 3^m 은 실험의 크기이며, $(3^m - 1)/2$ 는 직교배열표의 열의 수를 나타낸다. 3 수준계의 가장 작은 직교배열표는 $m=2$ 의 $L_9(3^4)$ 이다. $m=3$, 4일 때에는 $L_{27}(3^{13})$, $L_{81}(3^{40})$ 이 된다. 본 연구에서는 열 번호와 설계변수의 번호를 일치하여 실험하고자 하며, 설계변수의 개수가 포함되는 직교배열표 중에서 가장 적은

실험횟수를 가지는 직교배열표를 이용한다. 직교배열표를 이용하면 요인배치법, 중심합성계획법과 같이 각 설계변수에 대해 영향력을 고르게 분포시킬 수 있다. 즉 각 설계변수에 대해 동일한 수의 하한과 상한을 고려한 실험을 통해 근사식의 정확도를 높일 수가 있다.

가장 작은 직교배열표는 m 이 2인 경우로 실험횟수는 9 번이고 열의 수는 4가 되고, 표 2에 나타내었다. 본 연구에서는 표 2에 있는 -1과 1이 순차 설계영역의 하한과 상한을 나타내고, 0은 중간값을 나타낸다. 그리고 표 2를 이용해서 설계변수가 4개까지 9번으로 실험이 가능하다.

2.2 형상모델링과 해석 자동화

형상 최적화 과정에서 대상물의 형상이 변경되는 설계변수를 선정하는 방법은 절점의 좌표를 직접 설계변수로 취하는 방법과 설계대상물의 형상을 근사곡선으로 표현하고 스프라인이나 다항식을 제어할 수 있는 값을 설계변수로 선정하는 방법이 있다. 설계대상의 영역경계를 곡선으로 매개변수화 하지 않고, 절점들의 좌표를 직접 설계변수로 하면, 불규칙적인 형상을 얻는다. 그리고 경계의 절점수가 많으면, 설계변수의 수도 늘어나서 계산의 비용과 소요시간이 늘어난다. 본 연구에서는 모델에서 형상을 변화시키기 위해서 Pro/Engineer의 매개변수방법을 사용하였다. 매개변수를 서프라인 곡선의 컨트롤 포인트를 설계변수 겸 매개변수로 선정하여 모델의 형상을 표현하도록 하였다. 또한 단면의 특정 치수를 매개변수로 선정하면 치수최적화도 가능하다. 그림 1은 Pro/Engineer에서 매개변수화 하였을 때를 나타낸다. Pro/Engineer의 추적 파일인 Trail.txt 파일을 사용하여 모델을 효과적으로 변경 할 수가 있다. 초기에 주어진 매개변수로 정의된 Pro/Engineer의 모델파일을 불러와 설계변수인 매개변수를 변화시켜 모델의 형상을 변화시킨다. 또한 변경되어진 모델은 해석 프로그램에서 호환되는 IGS파일로 변환시키고 해석을 위한 초기 형상이 된다. 이 모든 작업은 Pro/Engineer의 추적파일을 이용함으로써 자동적으로 모델의 수정하였다. 모델 자동 생성을 위한 추적파일의 일부 예를 그림 2에 나타내었다. ANSYS의 사용자 명령어인 매크로 파일을 사용하여 해석하였다.

이 파일은 텍스트 형태의 파일로서 사용자가 수정이 용이하고, 프로그램언어의 형태를 취하고 있다. 해석하고자 하는 모델의 물성치와 경계조건과 하중 조건을 부여 할 수 있고, 해석 방법 등의 명령어를 취급할 수 있다. 프로그램언어의 형태를 가지고 있기 때문에 손쉽게 응용이 가능하다. 본 연구에서는 목적값인 부피와, 제약조건인 응력, 변위값을 실험점에 의한 매크로파일을 이용하여 해석하였다.

표 2 Three level orthogonal array for nine runs with four variables

RUN	1	2	3	4
1	-1	-1	-1	-1
2	-1	0	0	0
3	-1	1	1	1
4	0	-1	0	1
5	0	0	1	-1
6	0	1	-1	0
7	1	-1	1	0
8	1	0	-1	1
9	1	1	1	-1

-1: the lower bound of sequential design domain
 0: the center point of sequential design domain
 1: the upper bound of sequential design domain

3. 순차 근사 형상 최적화

순차 근사 최적은 Schmit와 Farshi가 제안하였다.¹¹⁾ 순차 근사 최적은 제약조건으로 이용되어지는 응력이나 변위에 대한 근사식을 만드는데 필요한 정보를 얻기 위하여 구조해석을 일차적으로 수행한다. 이 과정은 반복적이고 많은 시간이 필요하다. 본 연구에서는 2장에서 제시한 형상 모델링과 해석자동화 과정을 통하여 응력과 변위 그리고, 목적함수로 사용되어지는 형상의 부피를 구하여 근사식을 구성하였다.

구조물 최적설계에서는 구조물의 전체 중량을 목적함수로 하는 경우가 많고, 구속조건으로 최대응력, 최대변위, 국소좌굴 등의 구조 역학적인 조건, 설계시의 기하학적 제약조건, 구조부재의 제작에 따른 제약 등이 있다. 본 연구에서는 목적함수를 구조물의 부피로 하였고, 제약조건을 변위와 응력값으로 하는 다음과 같은 식으로 최적설계문제를 정식화 하였다

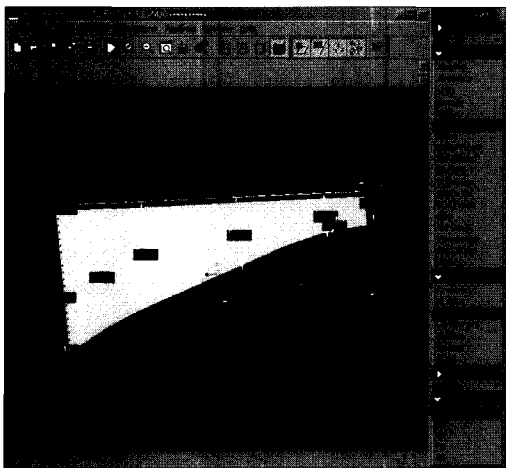


그림 1 Parameter selection

Find b
 Minimize $\Phi(b) = \frac{\hat{y}}{y_{aver}}$ (8)

Subject to
 $g_i(b) = \frac{|\sigma_i|}{\sigma_a} - 1 \leq 0, (i=1, \dots, n_c)$ (9)

$$g_{i+n_c}(b) = \frac{|z_i|}{z_a} - 1 \leq 0, (i=1, \dots, n_c)$$
 (10)

$$b_{Li} \leq b_i \leq b_{Ui}, (i=1, \dots, n_d)$$
 (11)

여기서 b 는 설계변수 벡터이다. 형상최적설계에서 설계변수벡터 b 는 구조물의 형상을 나타내는 매개변수가 된다. \hat{y} 은 부피 근사함수이고, y_{aver} 는 부피 평균값이다. 식 (9)와 식 (10)은 각각 응력, 변위제약조건의 일반화이고, 식 (11)은 경계조건이다. n_c 은 경계면의 절점의 수이고, n_d 는 설계변수의 개수이다. 2.2절에서 설명한 Pro/Engineer에서 사용하는 매개변수법으로 정의하고 스프라인 곡선 또는 곡면으로 나타내었다. 목적함수는 순차 설계영역의 각 실험점에서 구한 부피값을 최소사승법으로 근사식을 구하였다. 목적함수의 근사식은 실험점들의 평균값을 나누어 식 (8)과 같이 일반화하여 사용하였다. 제약조건은 설계형상 내의 모든 절점의 변위와 응력값을 사용한다. 각 실험에서 형상변화로 인하여 절점의 생성 개수가 변화하는 문제점이 있다. 즉 일정 절점을 생성시키기 위해서는 절점을 일정하게 유지시켜야 한다. 본 연구에서는 모든 절점을 제약조건으로 사용하지 않고, 경계면의 절점만을 제약조건으로 사용하였다. 일반적으로 구조물의 변위와 응력은 경계면에서 최대값이 나타난다. 경계면만을 제약조건으로 사

```
#SET UP
#PARAMETERS
#MODIFY
#b1
    29.139
#MODIFY
#b2
    17.292
#MODIFY
#DONE/RETURN
#DONE
#REGENERATE
#IGES
TEST010
```

그림 2 Example of trail file

용하여 제약조건의 수를 줄이고, 경계면의 절점수만 일정하게 유지하였다.

순차 설계영역은 실험점의 상한과 하한에 의한 영역이다. 초기 값에서 적당한 읍셋량으로 순차설계영역을 정의한다. 순차 설계영역은 수렴조건과 이동량의 기준이 되므로 문제에 적합한 정의가 필요하다. 넓은 순차설계영역의 반응값을 근사식으로 표현하면, 근사식의 오차로 인하여 수렴하지 않거나, 부정확한 해가 도출 될 수 있다. 고차항의 근사식을 사용하면, 넓은 순차 설계영역에서도 오차가 줄어든다. 본 연구에서는 설계변수 값의 10%를 읍셋량으로 정하고, 각 설계변수들 간에 크기 차이에 의한 읍셋량의 차이를 줄이기 위하여 자연로그함수를 이용하였다. 차수가 낮은 설계변수는 변화량을 크게 하여 범위를 넓게 설정해도 근사식의 정확도가 유지된다. 각 설계변수들의 크기를 1, 10, 100이라고 할 경우, 각 설계변수는 약 14%, 4% 그리고 2%의 변화량을 가진다. 1의 경우는 절대치로 ± 0.1의 폭을 가지고, 10의 경우는 ±0.3의 폭, 100의 경우는 ±1.78의 폭을 가지게 된다.

순차 설계영역에 근접한 해일수록 근사식과 실제 반응값과 오차가 작다. 반면 순차설계영역에서 멀리 떨어질수록 근사식의 해와 실제 응답량과 많은 차이가 있다. 일반적인 순차 근사 최적화에서는 각 단계의 수렴해가 다음 실험점의 초기 값이 되어진다. 각 단계에서 근사식이 전체 설계영역에서 정확성을 가지고 있지 않으면, 그 단계에서 도출한 해는 많은 오차가 발생하는 어려움이 있다. 부정확한 해가 다음 단계의 초기값이 되면 물리적 법칙을 만족하는 해를 구할 수 없다. 본 연구에서는 다음과 같이 이동량을 제한하는 식을 적용하여 부정확한 해를 구하더라도 모델생성의 실패를 줄이고 수렴성을 좋게 하였다. 이전단계의 해와 그 단계의 해의 변화량이 작을수록 많은 이동량을 가지게 된다. 반면 해의 변화량이 클수록 도출된 해는 많은 오차를 포함하고 있다고 가정하고 이동량을 감소하여 다음 실험점의 초기값을 가지도록 하였다.

$$X_{(i)}^{new} = X_{(i)}^{old} + (X_{(i)}^{opt} - X_{(i)}^{old}) \left(1 - \frac{|X_{(i)}^{oldopt} - X_{(i)}^{opt}|}{X_{(i)}^{old}} \right) \quad (12)$$

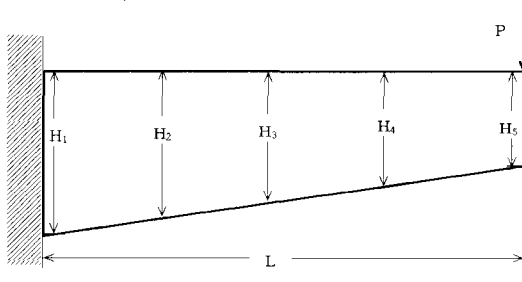


그림 3 Cantilever

여기서 i 는 설계변수의 수를 나타내고, $X_{(i)}^{new}$ 는 새로운 실험 중심점이며, $X_{(i)}^{old}$ 는 근사식에 생성에 이용된 중심점, $X_{(i)}^{oldopt}$ 는 이전단계의 수렴해이고 최초에는 초기값이 된다. $X_{(i)}^{opt}$ 는 각 단계에서의 수렴해이다.

단계의 수렴해 변화량이 일정 수준 이하가 되면 순차 근사 형상 최적화 알고리즘은 수렴한다. 즉 단계에서 얻어지는 수렴해가 제한된 영역 내에 연속적으로 존재하면 더 이상 개선할 수 없으므로 최적해로 생각하였다. 본 연구에서는 근사식의 정확도가 유지되는 영역을 제한된 영역이라고 하고, 그 영역을 순차설계영역과 같은 크기로 하였다. 일반적으로 순차 근사에서 순차설계영역의 2배에 해당하는 영역까지도 정확성을 유지한다. 그러나 형상 설계에서는 많은 비선형을 포함하고 있으므로, 순차 설계영역에서 두 번 연속으로 해가 존재하면 수렴하는 것으로 정의하였다.

4. 예 제

제안된 순차설계영역과 이동량 제한을 몇 가지 형상최적화 문제에 적용하였다. 부피최소화가 목적함수이며, 제약조건은 변위와 응력값이다. 전체 절점을 모두 제약조건으로 사용하지 않고, 외곽 경계면을 제약조건으로 사용하여 형상이 변하더라도, 제약조건의 수에는 변화가 없도록 하였다. 그리고 각 단계의 수렴해는 순차이차 계획법인 PLBA 알고리즘을 이용하여 구하였다.

4.1 외팔보

외팔보에 자중과 자유단에 집중하중이 가해졌을 때의 형상을 그림 3에 도시하였고, 외팔보의 폭은 1 m로 하였다. 표 3에 설계에 필요한 데이터이다.

최적해에서 설계변수 H_1 은 11.972 m로 초기치의 10 m 보다 증가하였고, H_2 는 6.925 m, H_3 는 5.110 m, H_4 는 3.241 m, H_5 는 1.758 m로 감소하였다. 초기값이 200 m³에서 107.2 m³으로 46.4%의 부피 감소를 나타내었다. 각

표 3 Design data for cantilever

Design data	Value
Length L	20 m
Modulus' elasticity E	21 GPa
Poisson's ratio ν	0.15
Load P	1,000 kN
Density ρ	24 kN/m ³
Allowable stress σ_a	34 MPa

단계에서 형상의 변화 과정을 그림 4에 나타내었고, 그림 5에 최적해의 형상을 나타내었다.

그림 6은 최적해의 정확도를 비교하기 위한 응력분포이다. 최대응력은 집중하중이 가해지는 부분에서 발생하였고, 최대 응력값은 34.61 MPa로 나타났다. 허용응력이 34 MPa로 약 2%의 오차를 나타내었다.

4.2 베어링덮개

그림 7은 저널베어링 덮개의 모델이다. 베어링 덮개는 균일한 높이를 가지며, 볼트로 체결되었고, 저널이 통과하는 부분에 압력을 받는다. 그림에서 53.400 kN의 하중은 체결볼트에 의한 하중이다. 저널 통과부의 압력은 저널의 작동에 따라 변화하는데, 설계하중은 최고압력 25.16

MPa이다. 재료의 물성치는 표 4에 있다.

2분의 1의 형상모델을 최적화 하였다. 베어링 상단 부분을 스프라인 곡선으로 정의하고, H₁, H₂, H₃의 점을 지나는 곡선을 생성 시켰다. 제약조건으로 응력과 변위를 적용시켰다. 볼트체결부위에서 응력 제한 조건을 초과하는 응력이 발생하는데, 볼트체결부위에서 집중응력이 발생하여 부정확한 응력이므로 제한 조건에 포함시키지 않았다. 볼트 체결부위를 제외한 외곽 경계면을 제약 조건을 선정하였고, 제약 조건의 수는 82개이다. 그림 9에 나타난 것처럼 최적해에서 설계변수는 H₁은 73.70 mm, H₂는 71.09 mm, H₃는 50.65 mm, B₁은 77.52 mm 이다. 목적함수는 50000 mm³에서 43890 mm³로 12%의 부피 감소 효과가 나타났다. 실제 목적값은 43898 mm³로서 1% 내의 오차가 있다.

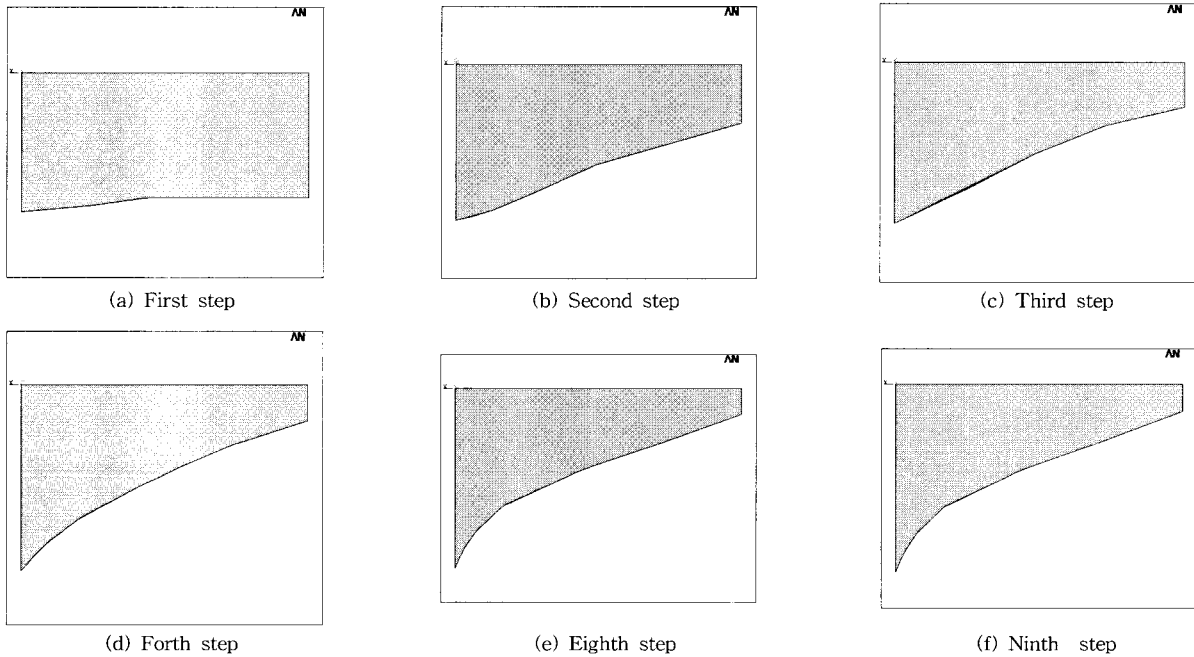


그림 4 Optimum shape after each step

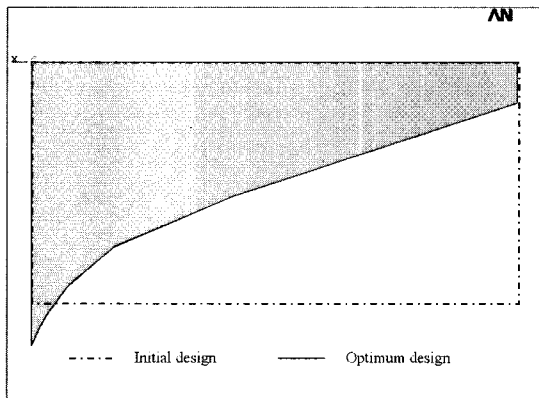


그림 5 Optimum design

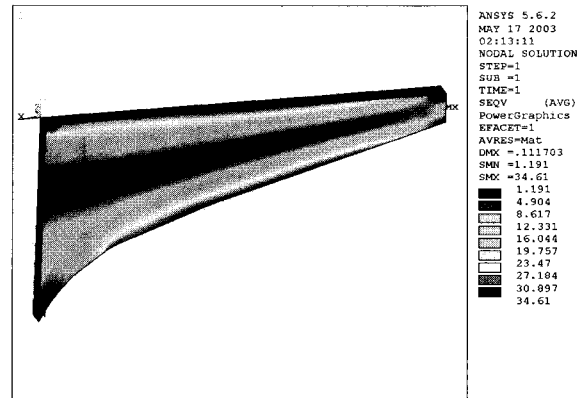


그림 6 Stress distribution of cantilever

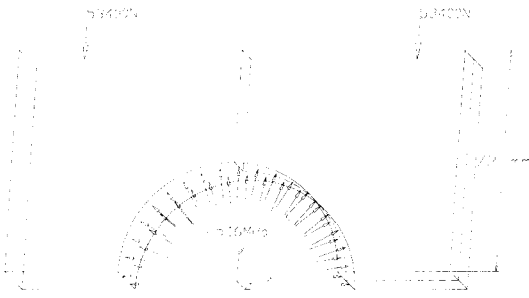


그림 7 Geometric configuration of bearing cap

표 4 Design data for bearing cap

Design data	Value
Modulus' elasticity E	200 GPa
Poisson's ratio ν	0.3
Load P	53.4 kN
Density ρ	24 kN/m ³
Allowable stress σ_a	279 MPa
Allowable displacement. Z_a	0.016 mm

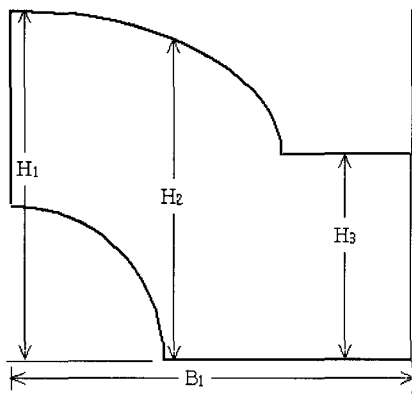


그림 8 Design variables of bearing cap

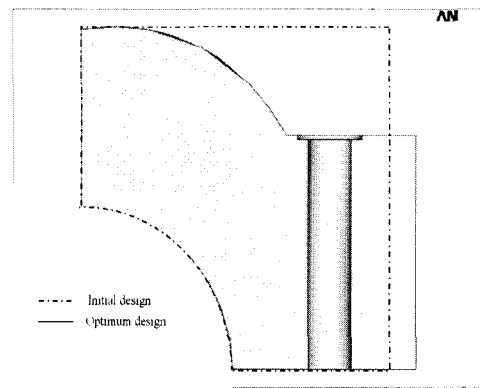


그림 9 Optimum design

5. 결 론

본 연구에서 근사 순차설계의 개념을 형상최적화에 적용하였다. 저차함수로 표현할 수 있는 순차설계영역을 정의하고, 보다 안정적으로 수렴할 수 있게 이동량을 조절하는 방법을 제안하였고 수렴해의 변화를 제한할 수 있는 수렴조건을 사용하였다. 또한 상용프로그램인 Pro/Engineer와 ANSYS를 최적화 알고리즘에 적용하기 위하여, 텍스트 형태의 파일을 사용하여 각각의 프로그램을 제어하였다.

- 1) CAD 소프트웨어인 Pro/Engineer에서 매개변수를 설계변수로 한 최적설계문제를 모델링하고 ANSYS 해석이 필요한 물성치, 하중조건, 절점생성, 제약조건을 위한 경계면의 선택을 정의하여 텍스트 형태의 파일을 생성함으로써 설계자동화를 실현하였다.
- 2) 설계영역이 큰 경우에 순차설계영역을 정의하고, 적용할 수 있는 이동량을 제한함으로써, 형상 최적화에서 보다 안정적으로 최적해를 구할 수 있었다.
- 3) 매개변수를 설계변수로 적용함으로써 적은 수의 설계변수로 형상을 구할 수 있었다. 또한 해석결과에서 실제와 2%이내의 오차가 있었다.

- 4) 형상의 매개변수로 스플라인 곡선을 사용하면 설계 변수의 선정이 단순하고, 기하학적인 제약조건을 쉽게 설정 할 수 있었다.

후 기

이 연구는 한국과학재단 지정 최적설계 신기술 연구센터의 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. R. T. Haftka and Z. Gurdal, "Element of Structural Optimization," Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1991, pp.209~215
2. 홍경진, "최적설계를 위한 반응표면의 생성에 관한 연구," 대한기계학회논문집A권, 제24권 제6호, 2000, pp.1408~1418
3. M. F. Anjum, I. Tasadduq, and K. Al-Sultan, "Response Surface Methodology: A Neural Network Approach," *European Journal of Operational Research*, 1997, pp.65~73
4. 박영선 이완익 박경진, "최적설계 시 이차근사법의 수치 성능 평가에 관한 연구," 대한기계학회 논문집, 제16

- 호, 제2권, 1995, pp.236~247
5. 임오강, 김정진 “근사 최적설계를 위한 순차 설계영역에 관한 연구,” 한국전산구조공학회논문집, 제14권, 제3호, 2001, pp.339~348
 6. Parametric Technology Corporation, Pro/Engineer Fundamentals Release 18.0, 1997.
 7. ANSYS APDL Programmer's guide Release 5.5. Swanson Analysis System, Inc., 1998
 8. J. S. Arora, *Introduction to Optimum Design*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1989, pp.625
 9. R. H. Myers and D. C. Montgomery, *Response Surface Ethodology-Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, John Wiley & Sons, Inc., Canada, 1995, pp.16~21
 10. S. Burgee, A. A. Giunta, V. Balabanov, B. Grossman, W. H. Mason, R. Narducci, R. T. Haftka and L. T. Watson, “A Coarse- Grained Parallel Variable-Complexity Multidisciplinary Optimization Paradigm,” *The International Journal of Supercomputer Applications and High Performance Computing*, Vol. 10, No. 4, 1996, pp.269~299
 11. R. T. Haftka and Z. Gurdal, *Element of Structural Optimization*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1991, pp.209~215