

< 논문 >

## 응답량 재사용을 통한 순차 근사최적설계

임오강\* · 황태경\* · 최은호\*  
(2004년 5월 31일 접수, 2004년 12월 1일 심사완료)

### A Sequential Approximate Optimization Technique Using the Previous Response Values

O-Kaung Lim, Tae-Kyung Hwang and Eun-Ho Choi

**Key Words:** Sequential Design Domain(순차 설계영역), Shape Optimum Design(형상최적설계),  
Response Value(응답량), Response Surface Methodology(반응표면법)

#### Abstract

A general approximate optimization technique by sequential design domain(SDD) did not save response values for getting an approximate function in each step. It has a disadvantage at aspect of an expense. In this paper, previous response values are recycled for constructing an approximate function. For this reason, approximation function is more accurate. Accordingly, even if we did not determine move limit, a system is converged to the optimal design. Size and shape optimization using approximate optimization technique is carried out with SDD. Algorithm executing Pro/Engineer and ANSYS are automatically adopted in the approximate optimization program by SDD. Convergence criterion is defined such that optimal point must be located within SDD during the three steps. The PLBA(Pshenichny-Lim-Belegundu-Arora) algorithm is used to solve approximate optimization problems. This algorithm uses the second-order information in the direction finding problem and uses the active set strategy.

#### 1. 서론

빠른 계산능력을 가진 컴퓨터의 발달과 상용프로그램의 발전에 힘입어 시스템의 품질을 향상시키고 제품의 설계시간을 단축할 수 있는 최적설계를 위한 통합시스템 구축에 관한 연구가 활발하다.<sup>(1)</sup> 그러나 상용 프로그램을 최적화 프로그램과 상호 연결할 경우에는 연결 프로그램의 작성이 어렵고 두 프로그램의 데이터를 교환하는데 시간이 많이 소요된다. 그러므로 복잡한 시스템으로 인한 대용량 문제의 계산 수행시간을 줄이고

수렴성을 향상시키는 알고리즘을 개발이 필수적이다.

설계 요구조건과 수와 결정해야할 설계변수의 수가 많은 대규모 설계문제에서는 근사최적화 방법을 적용하면 설계 완료를 위한 반복횟수 즉, 실험시간이 크게 줄어든다.<sup>(2)</sup> 근사함수 모델의 함수 형태를 구하기 위해 반응표면법을 이용한다. 반응표면이라 불리는 시스템의 실제모델은 일반적으로 알 수가 없으며 또한 알고 있을 경우라도 일부 설계영역에서만 유용하다.

순차 근사 최적은 Schmit와 Farshi가 제안하였다.<sup>(3)</sup> 근사최적의 단계는 전체 설계영역에서 정확도를 유지하는 적당한 근사식의 형태를 결정하여 일차 혹은 이차, 고차다항식을 근사식으로 이용하여 해석한 데이터 값을 최적화 알고리즘에 적용시켜 순차 근사 최적설계를 수행한다. 그러나 기존의 순차 근사 최적설계방법은 근사식이 전체 설계 영역의 반응표면을 표현하지 못하여 초기 최적해가 하한이나 상한에 수렴하는 결과를 도출

\* 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

E-mail : oklim@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2306 FAX : (051)582-9164

\* 부산대학교 대학원 기계설계공학과

하거나 수렴값이 각각의 반복회에서 진동하는 결과를 보이는 경우가 많았다.<sup>(4)</sup> 지금까지 이러한 결과를 막기 위하여 강제로 최적해의 이동량을 제한하거나 실험점을 늘려서 정확도를 높이는 방법 등이 있었다. 이는 많은 실험 횟수를 필요로 하며 최적설계의 각 단계에 있어서 기존의 실험점을 다시 반복 실험하는 경우도 있다.

본 논문은 먼저 각 단계의 순차설계영역에 있어서 비선형성이 큰 문제나 노이즈가 많은 표면에 있어서 근사식표현의 부정확함으로 가정한다. 근사식의 부정확함으로 인해 실험 횟수를 무한정으로 늘이면 오차분산이 크거나, 검출력이 낮아지는 등과 같은 추정의 폭이 넓어진다.<sup>(2)</sup> 정확도를 높이는 방법으로 반복횟수마다 실험방법을 각 설계변수에 대해 동일한 영향력을 가진 직교배열표를 쓰고 각 단계에서 최적해에 수렴 하지 않을 경우 전 단계의 응답량을 재사용하여 실험조건을 변화시킬 것으로 판단되는 것을 인자로 취하여 실험배치를 재구성하거나 블록의 반복수를 늘리는 실험방법을 사용하여 각 단계의 응답량을 효과적으로 다루어 설계완료로 위한 반복횟수가 크게 줄어든다. 순차 설계영역은 설계변수의 초기값의 10%로 해당하는 값을 설계변수의 변화량을 주어 각 설계변수를 상하로 변화시켜 구하였다. 각 단계의 수렴하는 순차 이차 계획법인 PLBA (Pshenichny-Lim-Belegundu-Arora)알고리즘<sup>(4)</sup>을 사용하여 해를 구하였다. 구하여진 해에 의해서 각 단계의 수렴해가 정해지고, 수렴해가 연속하여 순차 설계영역에 존재하면 최적해로 간주하였다.<sup>(5)</sup>

## 2. 반응표면법의 개선

반응 표면 분석은 여러 개의 설명변수가 복합적인 작용을 함으로써 어떤 반응변수에 영향을 주고 있을 때, 이러한 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계적인 분석방법을 말한다. 각각의 인자의 변화에 따른 반응량에 따라 임의의 반응표면을 갖게 된다. 이 반응표면을 통계적 모형을 만들어 응답량과 인자간의 방정식으로 표현한다. 근사 최적설계에 있어서 반응표면법<sup>(6)</sup>을 이용하여 근사식을 구하는 구체적인 이유는 적은 노력과 비용으로 정확한 근사식을 얻는데 있다. 그러므로 설계자는 반응표면법을 이용하여 실제의 복잡한 시스템의 응답량에 대한 해석결과를 매끄럽게 함으로써 전체적인 해석결과와 형태를 잘 표현할

수 있다. 근사식을 형성함에 있어서 실험계획법은 설계영역 내에서 필요한 실험점의 위치와 실험점의 개수를 결정하는 체계적인 방법을 말한다. 반응표면법에서 실험점들의 선택은 반응표면의 근사화의 정확도와 비용에 중요한 영향을 준다. 그러나 이 또한 근사식 생성에 있어 실험점의 누락으로 반응면의 정보가 부정확하게 표현되는 경우가 많다. 일반적인 반응표면법에서 사용되는 실험계획법에는 요인배치법,<sup>(7)</sup> 무작위추출법, 라틴방격법, 교락법과 일부실시법, 직교배열법, 중심합성계획법,<sup>(8)</sup> D-optimal design<sup>(9)</sup> 법과 본 연구에서 제안하는 수정된 반복 실험계획법과 혼합 수준계를 가지는 실험 계획법 등이 있다.

### 2.1 수정된 혼합 직교 배열표

기존의 순차 근사 최적설계에 있어서 3수준계나 2수준계의 직교배열표를 써서 근사식을 만들었다. 3수준계는 4개부터 13개의 설계변수까지 사용할 수 있는 27회의 실험 횟수를 가진다. 주로 많이 사용하는 설계변수가 7개까지는 2수준일 경우 필요한 실험횟수 8회가 되어 3수준 보다 적은 실험 횟수를 가진다. 그러나 최적 설계시 이러한 2수준계의 직교배열표는 비선형 근사식을 만들 수 없으며 설계변수가 증가함에 따라 필요한 인자의 응답값의 누락에 따른 근사식의 부정확함으로 최적값이 국부최적으로 수렴하는 경향을 보이므로 3수준의 직교배열표를 쓴다.

비선형의 근사식을 쓸 때에는 기존의 2수준계 직교 배열표에서 실험 횟수를 증가 시키는 방법으로 수준을 증가하여 사용하였으며 그 배열은 Table 1, 2와 같다. 이 또한 1회의 선 탐색 후 비선형의 근사식이나 정확도를 높일 때 쓰이며 3수준의 직교 좌표계에 추가되는 방식을 사용하였다.

### 2.2 수정된 혼합실험계획법의 검증

반응표면을 분석하기 위해서 근사 반응 함수를 생성한다. 최소자승법은 반응표면법에서 어떤 시스템의 성능을 나타내는 회귀 모델의 회귀 계수를 추정하는데 일반적으로 사용된다. 실제로 이와 같은 반응 함수는 알려져 있는 경우가 거의 없으며, 부분적으로 알려진 경우에도 실용성이 매우 적은 복잡한 함수의 형태가 대부분이다.<sup>(10)</sup>

Table 1 Added two level orthogonal array

Run	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	1	1	1
3	0	1	1	0	0	1	1
4	0	1	1	1	1	0	0
5	1	0	1	0	1	0	1
6	1	0	1	1	0	1	0
7	1	1	0	0	1	1	0
8	1	1	0	1	0	0	1
.....							
9	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	0	0	0	0
11	1	0	0	1	1	0	0
12	1	0	0	0	0	1	1
13	0	1	0	1	0	1	0
14	0	1	0	0	1	0	1
15	0	0	1	1	0	0	1
16	0	0	1	0	1	1	0

0: the lower bound of sequential design domain  
 1: the upper bound of sequential design domain

Table 2 Added three level orthogonal array

Run	1	2	3	4	5	6	7
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	-1	-1	-1	1	1	1	1
3	-1	1	1	-1	-1	1	1
4	-1	1	1	1	1	-1	-1
5	1	-1	1	-1	1	-1	1
6	1	-1	1	1	-1	1	-1
7	1	1	-1	-1	1	1	-1
8	1	1	-1	1	-1	-1	1
.....							
9	-1	-1	0	0	0	0	0
10	-1	0	-1	1	0	0	1
11	-1	0	0	0	1	-1	-1
12	-1	1	1	1	-1	1	0
13	-1	1	-1	0	-1	1	0
14	-1	1	0	1	0	-1	1
15	-1	1	1	-1	1	0	-1
16	0	0	-1	1	1	0	0

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

최소자승법을 이용해 구한 근사함수는 근사화의 정확성을 평가하는 과정이 필요하다. 이러한 과정을 회기분석이라고 한다. 위의 혼합 실험 계획법으로 도출된 근사식의 설계변수와 목적함수와의 관계를 어느 정도 잘 표현 하였는가를 확인하는 과정이 필요하다.<sup>(6)</sup>

그 이유는 모형함수가 의미가 있는 경우에 한하여 올바른 최적설계를 할 수 있는 것이므로 모형함수의 올바른 판단을 위하여 분산분석표를 이용하여 여기에 따른 결정계수를 구하였다.

하나의 측정값  $y_i$ 와  $y_i$ 들의 평균  $\bar{y}_i$ 와의 차이를 총 편차라고 하고 다음의 두 편차의 합으로

나타낼 수 있는데, 여기서  $\hat{y}_i$ 는 추정 함수값이다.

$$(y_i - \hat{y}) = (y_i - \hat{y}_i) + (\hat{y}_i - \bar{y}_i) \quad (1)$$

식 (1)의 양변을 제곱하고 모든  $i$ 에 대하여 합하면 다음과 같다.

$$\sum (y_i - \bar{y}_i)^2 = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 + \sum (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2 + 2\sum (y_i - \hat{y}_i)(\hat{y}_i - \bar{y}_i) \quad (2)$$

여기서 잔차들의  $\hat{y}_i$ 에 의한 가중합은 0이다. 각 항을 나타내면  $S_{SE}$ 는 편차 제곱합이라 하고, 주어진 설계변수값에서 목적함수값의 변동을 나타내는 것으로 모형함수에 의하여 설명 안 되는 변동을 뜻하고,  $S_{SR}$ 은 모형함수에 의해 설명되는 변동을 나타낸다. 식 (2)의 좌변항을 총 변동이라고 하고  $S_{ST}$ 라고 표기 한다.

$$S_{SE} = S_{ST} - S_{SR} \quad (3)$$

여기서  $S_{ST}$ 와  $S_{SR}$ 은 다음과 같다.

$$S_{ST} = \sum (y_i - \bar{y}_i)^2 = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 - \sum (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2$$

$$S_{SR} = \sum (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2 = \sum [\bar{y} + \beta_1(x_i - \bar{x}) - \bar{y}]^2 = [\beta_1]^2 \sum (x_i - \bar{x})^2$$

결정계수법을 하기 위해 두 가지 가설을 세우는데,  $\beta$ 는 각 항의 변수이며 다음과 같이 나타낸다. 여기서 귀무가설은 검정의 대상으로 삼는 가설이고, 대립가설은 이를 부정하는 가설이다. 귀무가설이 세워지면 표본을 관찰하여, 가설을 채택할 것인가, 부정할 것인가를 결정하기 위한 통계량을 채택하여야 한다. 이러한 통계량을 검정통계량이라 한다. 이 검정통계량도 통계량이므로 확률변수이며 확률분포를 갖는다. 검정통계량의 분포를 알면 그 영역을 기각역과 채택역으로 나누어 검정통계량의 값이 기각역에 속하면 귀무가설을 기각하고, 아니면 채택한다. 귀무가설이 맞을 때에도 검정통계량의 값이 기각역에 속할 때가 있는데, 이러한 확률을 검정의 유의수준이라 한다.

만약 귀무가설  $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \dots = \beta_k = 0$ 이 기각된다고 하면  $\beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3 \neq \dots \neq \beta_k \neq 0$ 이므로 모형함수가 유의하다고 본다.

$S_{SR}$ 이  $S_{SE}$ 보다 상당히 크다는 결론을 내릴 수 있다. 이는 총 변동  $S_{ST}$  중에서 회귀변동  $S_{SR}$ 이 차지하는 비율이 매우 크다고 결론을 지을 수 있다. 또 결정계수에 의해 판단하는 방법으로는 다음 식을 사용할 수 있다.

$$R^2 = \frac{S_{SR}}{S_{ST}} \quad (4)$$

이는 총 변동 중에서 모형함수에 의해 설명되는 변동이 차지하는 비율이다. 식 (3)의 값은 0과 1 사이의 값으로 상관관계가 클수록 식 (4)의 값은 1에 가까워지며, 이 값이 클수록 정확한 모형함수라는 판단을 할 수 있다. 기존 순차근사 최적 설계문제에서 각 반복회수마다 3수준의 직교배열표를 주로 써 왔다. 이는 실험점이 근사식의 정도와 실험점이 반영될 수 있기 위함이었다.

### 3. 응답량 재사용

본 연구에서는 다음의 순차 근사 최적의 흐름을 따른다. 공학적인 지식을 이용해 전체 설계영역에서 정확도를 유지할 수 있는 근사식의 형태를 결정하고 근사식이 만들어지는 영역인 초기 순차 설계영역을 결정한다. 그런 다음 설계변수의 개수에 맞는 가장 적은 실험횟수를 가지는 직교배열표를 선택하고 실험을 수행해 근사식을 구성하는데 필요한 시스템의 응답량인 응력이나 변위에 대한 정보를 구한다. 그리고 각 단계마다 응답값을 저장한 다음 최소 자승법으로 근사식을 구하고 근사식을 최적설계 알고리즘에 적용하여 최적해를 구한다. 이때 각 단계의 최적값이 수렴하지 않고 국소 최적값을 나타낼 경우 저장된 응답값과 수정 추가된 실험점으로 재설정된 실험 계획법으로 실험한다. 이때 기존의 저장된 실험점은 실험하지 않고 추가된 실험점만 실험한 다음 근사식을 다시 세운다. 수렴조건을 만족할 경우 순차 근사 최적 알고리즘을 종료하고 그렇지 않으면 순차 설계영역을 수정하는 단계를 거친 다음 수렴할 때까지 계속 진행한다. 본 연구의 순차 근사 최적설계의 흐름을 Fig. 1에 나타내었다.

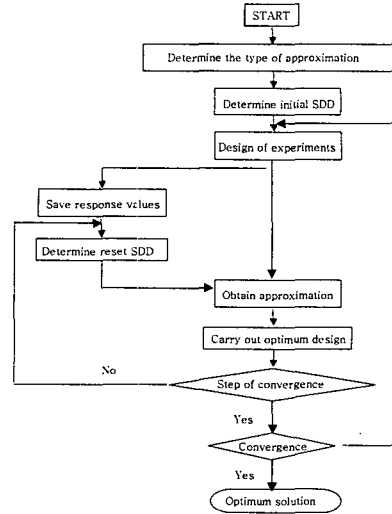


Fig.1 Flowchart of sequential approximate optimization

#### 3.1 재설정된 순차 설계영역

일반적으로 최적설계 문제의 상한은 아주 큰 값으로 그리고 하한은 아주 작은 값으로 주어지게 된다. 그러므로 전체 설계영역에서 구해진 근사식의 정확도는 떨어지게 된다. 그래서 본 연구에서는 각 단계의 근사식을 만들어지는 영역인 순차 설계영역<sup>(10)</sup>을 사용하고 각 단계에서 수렴하지 않았을 때 순차설계영역을 수정된 실험계획법에 따라 재설정하고자 한다. 순차 설계영역은 각 스텝에서 근사식이 만들어질 설계영역으로 설계변수를 변화시켜 구한다. 첫 번째 스텝의 순차 설계영역은 설계변수의 상한과 하한 차에 의한 전체 설계영역의 10%에 해당하는 영역을 중간값을 기준으로 읊셋한다. 다음 스텝들의 순차 설계영역은 바로 이전 스텝에 수렴한 해를 기준으로 정하는데, 근사식의 정확도를 높이기 위해 수렴한 해가 이전 스텝의 설계영역 안에 존재하면 설계영역을 50% 축소시키도록 한다. 설계영역을 축소시키는 이유는 근사식의 오차를 줄이기 위해서이다. 이때 각 단계의 근사식이 수렴 하지 않았을 때의 영역은 이전의 영역을 포함 하여 사용을 하거나 현재 영역에 배열을 달리한 실험계획법을 사용한다.

순차설계영역을 만들어서 최적점을 찾아내는 일련의 과정은 한번의 스텝으로 정의된다. 이때 수렴 점이 국부 최적설계점을 도출하거나 찾지 못 할 때에는 수렴조건에 따라 수정된 실험계획표를 적용하고 아니면 계속 직교배열표를 사용한다. 최적점이 기존의 순차설계영역 안에 존재하지

않을 때는 읍셋량을 변화시키지 않고 최적점 주위로 새로운 순차 설계영역을 만든다. 새로운 순차 설계영역에서 일련의 과정을 따라 다시 최적점을 찾고 찾아낸 최적점이 순차 설계영역 안에 존재하면 읍셋량을 절반으로 줄이고 최적점 주위로 다시 순차 설계영역을 설정한다.

### 3.2 응답량을 이용한 수렴조건

수렴조건에는 두 가지가 있다. 하나는 최적해의 변화량에 대한 제한조건이며 다른 하나는 알고리즘의 방향성에 대한 제한조건이다. 전자는 유효 순차 설계영역과 벡터 노음을 도입하여 두 스텝 동안 유효 순차 설계영역 내에 최적해가 존재하면 종료하는 조건이며 후자는 강하함수를 이용하여 방향성이 바뀔 때, 즉 강하함수 값이 증가할 때 종료하는 수렴조건이다. 두 가지 수렴조건 중에 하나만 만족하더라도 수렴하는 것으로 한다.

본 연구에서는 순차 근사 최적 알고리즘의 수렴조건으로서 최적해의 변화량에 대한 제한조건을 적용하였다. 스텝의 최적해 변화량이 일정 값 이하가 되면 순차 근사 최적 알고리즘은 수렴한다고 볼 수 있기 때문이다. 즉 스텝에서 얻어지는 최적해가 제한된 영역 내에 연속적으로 존재하면 수렴한다는 것이다. 본 연구에서의 최적해의 변화량을 제한한 수렴조건으로는 두 번의 반복 단계와 그 반복단계가 저장된 실험점으로 재설정된 영역 안에서 연속적으로 순차 설계영역 내에 최적해가 존재하면 종료시키는 수렴조건을 사용하였다.

## 4. 수치예제

채택된 순차 설계영역과 수렴 조건을 2차원 형상최적설계의 토크암과 3차원 형상최적설계의 위성 안테나 브래킷에 적용하였다. 모든 수치 예제의 목적 함수는 부피를 최소화 하는 것이고 설계 변수는 각 부재의 단면, 길이, 폭 그리고 너비 등 설계변수를 다양화하여 실험을 실시하였다. 제약 조건에는 응력과 변위 제약조건을 사용하였으며 각 단계의 최적해는 PLBA를 이용하여 구하였다. 각각의 예제는 기존의 순차 근사최적화 기법을 사용한 경우와 응답량 재사용을 이용한 혼합 실험 계획법을 비교하여 설명하였다.

### 4.1 토크암

본 예제는 대단부의 원형 내부를 고정하고 소단부의 끝단에서 횡하중이 작용한다. 형상과 설계 변수는 Fig. 2에 나타나 있다. 목적함수는 부피최소화로 설정하였으며 제약조건은 응력값으로 하였다. Table 3에는 해석에 필요한 물성치를 나타내었고, Table 4에는 설계변수의 초기치와 상한값, 하한값을 나타내었다. 본 실험에서는 3수준의 직교배열표를 사용하였으며 각 단계마다 27회의 실험 횟수와 이동량 제한을 통해 순차적인 최적설계값에 이르는 과정을 거친다.

본 실험은 7회의 반복 후 수렴하였고, Fig. 3은 각 설계변수의 변화를 나타낸다. 최적해에서 설계 변수  $R_1$ 은 30.0mm,  $R_2$ 는 17.67mm,  $B_1$ 은 22.5mm,  $B_2$ 는 17.93mm,  $B_3$ 는 15.73mm였다. 초기값이 229cm<sup>3</sup>에서 92cm<sup>3</sup>으로 59.6%의 부피 감소를 나타내었다.

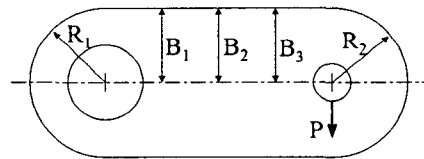


Fig. 2 Design variable of torque arm

Table 3 Design data for torque arm

Design data	Value
Modulus of elasticity $E$	200 GPa
Poisson's ratio $\nu$	0.3
Load $P$	10000 N
Density $\rho$	77 kN/m <sup>3</sup>
Allowable stress $\sigma_a$	120 MPa

Table 4 Design variables (Unit: mm)

Design variable	Initial	Lower	Upper
$R_1$	40.0	30.0	60.0
$R_2$	40.0	15.0	40.0
$B_1$	40.0	22.5	40.0
$B_2$	40.0	17.5	40.0
$B_3$	40.0	15.0	40.0

위의 실험과는 달리 응답량을 재사용 한 경우는 2수준의 직교배열표를 사용하였으며 각 단계마다 8회의 실험 횟수와 이동량 제한 없이 혼합 직교배열표의 통해 순차적인 최적설계값에 이르는 과정을 거친다. 6회의 반복 후 수렴하여 48회의 총 실험횟수를 가진다. 최적해에서 설계변수  $R_1$ 은 29.99mm,  $R_2$ 는 17.4mm,  $B_1$ 은 22.49mm,  $B_2$ 는 21.84mm,  $B_3$ 는 17.45mm였다. 초기값이 229cm<sup>3</sup>에서 92cm<sup>3</sup>으로 60%의 부피 감소를 나타내었다.

최대응력은 하중이 가해지는 부분에서 발생하였고 그 값은 185MPa이다. 토크암의 외곽 경계면만을 제약조건으로 하였다. 경계면의 최대 응력값은 110MPa로 유용해에 존재하였으며, 전체적으로 설계변수의 치수는 감소하였고, 기존의 최적해와는 약간 상이한 값을 도출하였으나 응력제약 조건을 만족하고 부피감소도 유사하여 신뢰성 있는 결과를 보였다. Fig. 4에 기존의 실험방법과 비교하였다. 반복횟수는 거의 차이가 없었으나, 27회의 3수준 직교배열표를 쓰지 않고 8회의 2수준 직교배열표에 기반 한 혼합 직교배열표와 응답량 재사용으로 실제 실험 횟수는 25%의 감소효과가 있다.

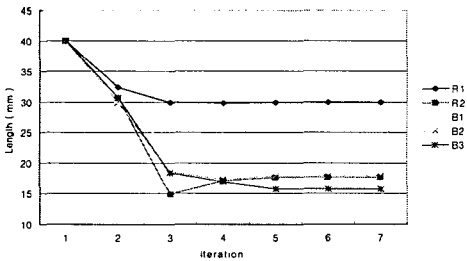


Fig. 3 Design variables history of torque arm

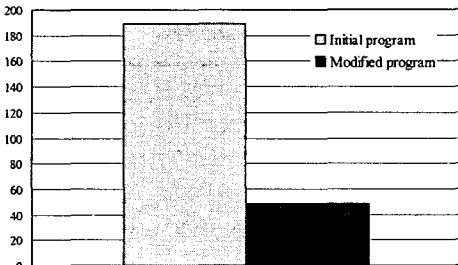


Fig. 4 Comparison with the number of experiments of torque arm

4.2 위성 안테나 브래킷

위성체 안테나는 위성 발사 시와 정지궤도 상에서의 동작환경이 지상과는 매우 달라 발사 시 강한 진동에 따른 내성, 진공 및 극심한 온도 변화에 따른 열적 변형 최소, 지지대 및 구조물의 고강도 등과 같은 기계적 특성이 충분히 고려되어야 한다. 특히 지지대 부품의 하나인 브래킷은 안테나의 지지구조물과 본체 연결구조물을 상호 연결시켜주는 주요한 부품으로 충분한 강성과 강도를 유지해야 한다. Fig. 5는 브래킷이 위성에 연결되는 모형이며, (A)는 투시도이며 (B)는 정면도이다.

Table 5는 브래킷의 물성치를 나타낸다. 브래킷에 작용하는 하중을 산출하기 위해 우선 위성체 발사 시 안테나 구조물이 받는 하중을 고려하였고, 응답값은 전체 구조물을 해석하여 나온 값을 사용하였다. 이때 외부하중은 위성체 구조물 발사 시 안테나 구조물이 받게 되는 하중으로, 각 축 방향으로 중력의 30배가 작용하는 조건을 적용하였다. 브래킷에 작용하는 하중은 Table 7과 같으며 이스트 패널에 연결되는 고정 브래킷과 백립 사이에 연결하는 부위로서 연결구멍에 작용하는 하중값을 보여준다.

설계변수는 모두 5개로 상부의 필렛 처리된 삼각형 모양과 하부의 사각형과 삼각형 모양의 구멍을 만듦으로써 중량 감소를 꾀하였다. 설계변수는 각부의 모서리부분의 곡률반경과 지지립의 위치와 두께를 선정하였으며, Fig. 6에 나타내었다. Table 7은 설계변수의 상한과 하한을 나타내며, 기하학적 한계가 상하한의 기준이다.

유한요소 해석은 Fig. 7에 나타내었으며 고체 사면체요소 32,321개의 요소 및 7,769개의 절점을 사용하였다.

본 예제의 경우 비선형성이 크고 노이즈가 많은 수치예제로서 혼합 실험 계획법을 사용하였으며 약 6회의 반복으로 수렴하였다. Fig. 8은 각 설계변수의 변화를 나타낸다. 최적해에서 설계변수  $X_1$ 은 3.51mm,  $X_2$ 는 25.8mm,  $X_3$ 는 3mm,  $X_5$ 는 3.7mm로 각각 감소하였고,  $X_4$ 는 4.13 mm로 증가하였다. 이는 중간의 하단 지지부의 두께가 감소하고, 하단부 구멍의 필렛부분의 반경이 늘어나면서 지지를 효과적으로 하였다. 디자인 변경 전의 143cm<sup>3</sup>에서 119cm<sup>3</sup>으로 21.5%의 부피 감소효과가 있었다.

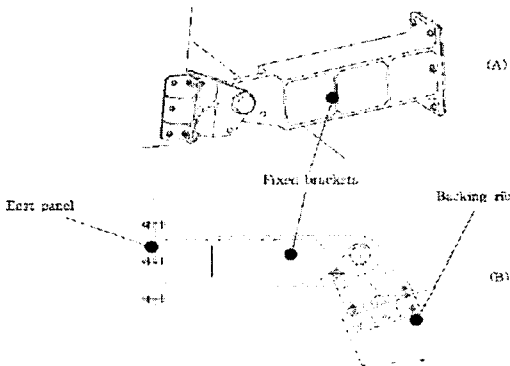


Fig. 5 Bracket model

Table 5 2304(UNS S32304)-Duplex stainless steel

Design data	Value
Modulus of elasticity ( $E$ )	180 GPa
Thermal conductivity ( $k$ )	19 $W/m \cdot K$
Poisson's ratio ( $\nu$ )	0.33
Shear modulus of elasticity ( $G$ )	70 GPa
Specific heat ( $C_p$ )	530 $J/kg \cdot K$
Density ( $\rho$ )	7800 $kg/m^3$
Allowable stress ( $\sigma_a$ )	450 MPa

Table 6 Value of bracket load component

Load component	Value	Load component	Value
Fx	929.9 N	Mx	-19315 Nm
Fy	-754.2 N	My	-20731 Nm
Fz	-222.0 N	Mz	197 Nm

Table 7 Design variables (Unit: mm)

Design variable	Initial	Lower	Upper
X <sub>1</sub>	4.5	3	6
X <sub>2</sub>	26	24	28
X <sub>3</sub>	4	3	5
X <sub>4</sub>	3.5	3	5
X <sub>5</sub>	4	3	5

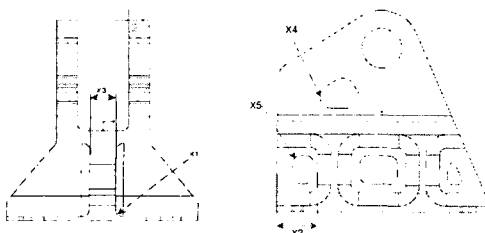


Fig. 6 Design variables of bracket

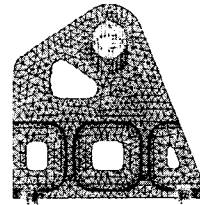


Fig. 7 FEM model

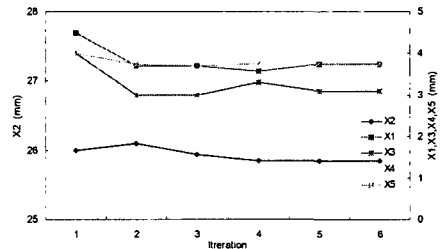


Fig. 8 Design variables history of bracket

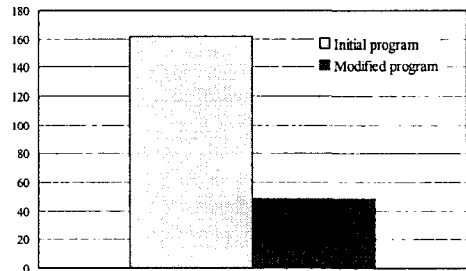


Fig. 9 Comparison with the number of experiments of bracket

기존의 순차 근사 최적설계의 부피변화와 설계 변수의 변화는 수정된 실험계획법과 유사한 결과 값을 나타내었으며, 이동량의 제한으로 설계변수와 목적함수의 값은 완만한 변화를 보였다. 약 6회의 반복회수로 수렴하였으며, 이 또한 응력 제약 조건을 초과하지 않았다.

제약조건은 하단부 립과 각각의 구멍의 필렛의 선상의 응력이 320MPa이 넘지 않도록 하였으며 변위는 1mm를 넘지 않도록 하였다. 최대 변위는 0.2 mm로 변위제약 조건을 초과 하지 않는 값을 나타내었으며 응력 제약 조건에 활성화되었음을 알 수 있었다. Fig. 9에 기존의 실험방법과 비교 하였다. 그러나 27회의 3수준 직교배열표를 쓰지 않고 8회의 2수준 직교배열표를 기반 한 혼합 직교배열표와 응답량 재사용으로 실제 실험 횟수는 65%의 감소 효과가 있다.

## 5. 결 론

## 참고문헌

실제 순차 근사 최적설계에 있어서 선 탐색 시간보다 각 실험점의 응답값을 구하는데 많은 시간이 소모된다. 이러한 문제를 극복하고자 하였으며, 근사 순차설계의 개념에서 각각의 실험 응답값을 다음 반복회의 근사식을 도출할 때 재사용함으로써 기존의 순차 근사최적설계와 동일하거나 근접한 정확도를 가지며 근사식의 차수 사용에 있어서 자유로울 수 있는 장점도 있었으며 이동량 제한을 두지 않아도 수렴하는 결과를 보였다. 3차원 형상 최적화 문제에 있어서 기하학적으로 복잡한 모델의 경우에는 각 단계에 있어서 이동량이 제한되어 있지 않아 설계변수값의 기복이 큰 매개변수를 사용한 모델의 경우 형상이 변수에 따라 모델이 형성되지 않는 경우도 있었다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 채택된 두 가지 수렴 조건은 2개의 예제를 통하여 일반적인 최적설계의 결과와 거의 일치하였다. 이동량 제한이 없어서 각 단계에서 설계변수의 변화나 목적함수의 변화의 기복이 심하였으나 수렴값은 기존의 최적설계값과 거의 동일하였다.

(2) 3차원 형상 최적설계는 실제 부품으로 위성 안테나 브라켓을 예제로 선정하였다. 중량감소를 위한 구멍을 생성하였으며 구멍의 크기, 지지판의 두께와 위치를 설계변수로 선정하였다. 응력 제약 조건에 활성화되었으며 응력은 제약조건으로 정해진 곳은 모두 제약조건을 넘지 않았다.

(3) 응답값의 재사용은 실제 순차 최적설계에 있어서 많은 시간감소효과를 보았으며, 실험 횟수 감소를 피하여 약 55%에서 60%의 실험시간을 단축시키는 결과를 보였다. 그러나 설계변수가 5개 미만의 경우 3수준 직교배열표의 경우 9회의 실험이 가능하므로 실험횟수 감소효과를 크게 보지 못하는 경우도 있었다.

## 후 기

본 연구는 한국 과학 기술 재단지정 최적설계 신기술 연구센터의 지원으로 수행되었습니다.

- (1) Kwak, B. M., Huh, J. S. and Yeom, K. S., 2001, "Development of a Structural Optimal Design Code Using Response Surface Method Implemented on a CAD Platform," *Proceedings of the KSME 2001 Spring Annual Meeting*, pp. 580~585.
- (2) Anjum, M. F., Tasadduq and Al-Sultan, K., 1997, "Response Surface Methodology: A Neural Network Approach," *European Journal of Operational Research*, pp. 65~73.
- (3) Haftka, R. T. and Gurdal, Z., 1991, "Element of Structural Optimization," Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 209~215.
- (4) Choi, D. H. and Hong, K. J., 2000, "A Study on the Construction of Response Surfaces for Design Optimization," *Journal of KSME(A)*, Vol. 24, No. 6, pp. 1408~1418.
- (5) Arora, J. S., 1989, "Introduction to Optimum Design," McGraw-Hill Book Company, New York, p. 625.
- (6) Myers, R. H. and Montgomery, D. C., 1995, "Response Surface Methodology-Process and Product Optimization Using Designed Experiments," John Wiley & Sons, Inc., Canada, pp. 16~21.
- (7) Kok, S. and Stander, N., 1998, "Optimization of a Sheet Metal Forming Process Using Successive Multipoint Approximation," *AIAA*, pp. 2728~2740.
- (8) Unal, R., Lepsch, R. A. and McMillin, M.L., 1998, "Response Surface Model Building and Multidisciplinary Optimization Using D-optimal Designs," *AIAA*, pp. 405~411.
- (9) Vender, G. and Haftka, R. T., 1997, "Minimum-Bias Based Experimental Design for Constructing Response Surfaces in Structural Optimization," *AIAA*, pp. 1225~1238.
- (10) Lim, O. K. and Kim, J. J., 2001, "A Study on the Sequential Design Domain for the Approximate Optimum Design," *Journal of COSEIK*, Vol. 14, No. 3, pp. 339~348.