

# 직교배열표를 이용한 불연속 공간에서의 교호작용을 고려한 구조물 설계

(2000년 1월 4일 접수)

황광현\* · 권우성\*\* · 이권희\*\*\* · 박경진\*\*\*

## Design of Structure Using Orthogonal Array Considering Interactions in Discrete Design Spaces

Kwang Hyeon Hwang, Woo Sung Kwon, Kwon Hee Lee and Gyung Jin Park

**Key Words :** Interactions(교호작용), Additivity(가산성), Sum of Squares(제곱합), Confounding(교락), Linear Graph(선점도), Analysis of Variance(분산분석), Orthogonal Array(직교배열표)

### Abstract

The design of experiment(DOE) is getting more attention in the engineering community since it is easy to understand and apply. Recently, engineering designers are adopting DOE with orthogonal arrays when they want to design products in a discrete design space. In this research, a design flow with orthogonal arrays is defined for structural design according to the general DOE. The design problem is defined as a general structural optimization problem. Sensitivity information is evaluated by the analysis of variance(ANOVA), and an optimum design is determined from analysis of means(ANOM). Interactions between design variables are investigated to achieve additivity which should be valid in DOE. When strong interactions exist, a method is proposed. Some methods to consider the problem are suggested.

### 1. 서 론

최적설계에서 설계 변수는 연속설계변수(continuous design variable) 및 이산설계변수(discrete design variable)로 분류할 수 있는데, 구조 최적 설계 시 설계 변수가 어떤 특정한 값들 중에서 선정되거나 규격화되어 있다면 설계변수는 이산설계변수로 취급되고 있다. 연속 설계공간에서의 최적해는 우수한 결과를 제공하지만 실제 적용시 최적해의 결과를 이산값으로 대치하여 사용해야 한다. 보통 이산값은 연속 설계공간에서의 최적해보다 한 단계 높은 값을 선정하여 적용하고 있다. 하지만 이러한 방법은 구조물의 경량화에 반하는 해를 선정하

게 되고 제한 조건을 위배할 가능성이 있다. 따라서 이러한 단점을 해결하기 위하여 설계 과정 중에 설계변수를 이산 값으로 취급하는 불연속 설계법이 요구되고 있다.<sup>(1-3)</sup>

지금까지 이산설계 공간에서의 최적 설계를 위해 많은 방법들이 제안되고 있다. Arora 등은 대화형 설계최적화<sup>(4)</sup> 통해 설계변수를 고정시키고자 하였지만 설계자동화 개념이 없어지고 설계자의 주관이 너무 작용한다는 단점이 있다. Salajeg-heh 등은 분단 탐색법(branch and bound method)<sup>(5)</sup>을 Wu 등<sup>(6)</sup>은 유전 알고리즘(genetic algorithms)을 이용하여 이산설계변수를 처리하였다. 유전알고리즘은 전역적 최적해를 구할 수 있는 통계적 최적화 방법으로써 이산설계 변수를 처리할 수 있는 알고리즘으로 알려져 있다. 그런데 유전 알고리즘에서는 자유도가 큰 구조설계문제에서 설계 반복 과정 중에 계속되는 유한요소 해석을 수행해야 하는 부담이 있다. 즉, 규모가 큰 구조설계 문제에서는 가능한 한 유한요소 해석 횟수를 줄일 수 있는 실험 계획법과 같은 접근법이 필요하다. 따라서 이산

\* 회원, 한양대학교 대학원 기계설계학과

\*\* (주) 캄코

\*\*\* 회원, 한양대학교 기계산업공학부

E-mail : gjpark@email.hanyang.ac.kr

TEL : (031)400-5246 FAX : (031)407-0755

설계공간에서의 보다 효율적인 최적 설계를 수행하기 위하여 실험 횟수를 줄이면서 다수의 설계변수를 취급할 수 있도록 일부실시법(fractional factorial design) 중의 하나인 직교배열표(orthogonal array table)를 도입하게 되었다.<sup>(7-11)</sup>

직교배열표를 사용하는 경우 설계변수에 해당하는 물리적인 인자(factor)들의 적정한 수준(level)과 각각의 중요도를 파악하면 효율적으로 설계에 접근할 수 있다. 직교배열표에 의한 실험계획법(design of experiments)에서는 특성치에 대한 설계변수들의 상호작용을 교호작용(interaction)이라 하고 이러한 상호작용의 영향이 설계목적에 반항적인 경향을 가진다면 트레이드오프(trade off)현상이 일어나므로 이를 제거하려고 노력하였다. 기존에는 구조물 설계시 반응치에 대한 각 인자의 기여도를 민감도로써 규명하였다. 그러나 각 인자의 기여도는 작더라도 인자간 교호작용의 기여도가 큰 경우에는 무시할 수 없게 되며 설계변수의 최적수준과 기여도에 대한 정보를 획득하는 과정에서 교호작용을 어떻게 이용할 것인가는 중요한 문제가 될 수 있다. 구조설계시 반응치에 대한 인자사이의 교호작용의 기여도는 실험계획법에서 이용되는 교호작용 효과와 제곱합을 구하는 방법으로써 산출되었다.

본 연구에서는 이산설계공간에서 구조물 설계시 실험계획법에서 사용되는 직교배열표를 이용하여 설계인자들 사이의 교호작용까지 고려할 수 있는 최적설계 방법을 제시하였다. 즉 실험계획법의 기법을 경제적인 구조물의 이산설계에 적용하기 위한 일련의 설계법을 제시한 것이다. 먼저 교호작용을 고려하지 않은 직교배열표를 구성하고 행렬실험을 수행하였으며 교호작용 존재 여부를 판단하기 위하여 제시된 행렬실험 모델에 대한 가산성(additivity) 평가를 실시하였다. 가산성이 위배되면 교호작용이 존재한다고 보고 이를 고려한 행렬실험을 수행하게 되는데 인자간 교호작용을 선정하기 위한 기준으로는 구간 민감도의 의미를 가지는 제곱합(sum of squares)을 이용하였다. 그리고 결과들에 대해 평균분석(analysis of means: ANOM)과 분산분석(analysis of variance: ANOVA) 기법을 적용하여 인자와 교호작용의 효과를 추정하고 최적수준을 선정하였다.<sup>(7)</sup> 개발한 설계기법을 검토하기 위하여, 10 부재 트러스(ten bar truss), 25 부재 전송탑(twenty-five member transmission tower), 5 부재 트러스(five bar truss)의 설계문제를 예제로 제시하였다.

## 2. 직교배열표를 이용한 실험계획법

### 2.1 직교배열표의 소개

공학적 의사결정에 수반되는 인자들에 대한 믿을 만한 정보를 얻기 위한 과정에서 실험계획법이 많이 도입되고 있다. 실험계획법의 종류는 여러 가지가 있으며 가장 정확한 방법은 모든 경우를 고려하는 전조합 실시법(full factorial experiments)이다. 그러나 이것은 실제 문제에 적용 시 설계변수 증가에 따른 실험횟수의 급격한 증가로 인해 바람직하지 못하다. 실험 계획법 중에서도 불필요한 교호작용이나 고차의 교호작용은 구하지 않고 각 인자의 조합 중에서 일부만 선택하여 실험을 실시하는 방법을 일부실시법이라고 한다. 일부실시법 중에서 몇 가지 인자(factor)들을 동시에 연구하기 위하여 여러 가지 형태의 행렬실험(matrix experiment)이 사용되는데 이는 연구하고자 하는 제품 또는 공정의 다양한 인자들의 값을 변화 시켜가면서 행하는 일련의 실험들로 구성된다.<sup>(7)</sup>

한 행렬실험이 실행되고 난 후, 모든 실험 데이터들을 분석하여 여러 인자들의 효과를 결정하게 되는데 직교배열이라는 특수한 행렬을 사용하여 행렬실험을 수행하면 인자들의 효과를 효율적으로 결정할 수 있다. 교호작용 가운데 기술적으로 생각하여 무시될 수 있는 것을 주효과(main effect)와 교락(confounding)시켜 실험의 크기를 줄일 수 있는 실험계획을 짜도록 고안된 표를 직교배열표라고 한다. 이러한 직교배열표를 통한 실험계획법이 가지는 제약조건으로서 직교배열표 사용 시 설계범위가 한정된다는 점과 회생되는 교호작용이 존재하고 있는가의 여부 혹은 무시할 수 있을 정도로 적은가의 기술적 검토가 필요하다. 직교배열표의 종류는 그 구조에 따라서 표준 직교배열표, 확대 직교배열표, 혼합 직교배열표, 응용 직교배열표로 크게 4 종류로 분류할 수 있다.

### 2.2 데이터 분석 및 최적인자 수준의 설정

분산분석은 실험계획법에서 가장 많이 사용되는 분석 방법으로, 특성치의 산포를 제곱합으로 나타내고 이 제곱합을 실험과 관련된 요인마다의 제곱합으로 분해하여 오차에 비해 특히 큰 영향을 주는 요인이 무엇인가를 찾아내는 분석 방법이다. 그리고 전체 평균으로부터 그 인자수준에 의한 결과의 편차로 정의되는 인자수준의 효과를 추정하는 것을 평균분석이라고 하며 최적 인자수준의 선정에 반영된다.

행렬실험을 행하는 주요목적은 제품 또는 공정

의 설계를 최적화하는 것, 즉 각 인자의 최적수준을 결정하는 것이다. 어떤 인자의 최적수준이란 실험영역 내에서 구하고자 하는 특성치를 최대, 최소 또는 특정값으로 산출하는 수준이며 인자수준에 따른 특성치의 변동이 가법모델(additive model)을 따른다면, 주효과와 추정치를 사용하여 최적수준을 결정할 수 있다. 가법 모델은 여러 인자들의 총 효과는 개별 인자효과의 합과 같다는 것을 나타낸다. 이것은 이 모델에서 인자효과를 추정할 때 단순 평균을 사용하는 방식의 타당성을 보여준다. 예를 들어 추정하고자 하는 특성치  $\hat{\eta}$ 에 대하여 인자 A, B, C, D 간의 교호작용이 무시된다면 다음과 같은 가법모델로 근사화 시킬 수 있다.

$$\hat{\eta}(A_i, B_j, C_k, D_l) = \mu + a_i + b_j + c_k + d_l + e \quad (1)$$

식 (1)에서  $\mu$ 는 전체평균,  $a_i$ 는 인자 A의 수준  $A_i$ 에서의 효과 ( $m_{A_i} - \mu$ )를 나타낸다. 마찬가지로  $b_j, c_k, d_l$  등은 각기 인자 B, C, D의 수준  $B_j, C_k, D_l$ 에서의 효과를 나타내고,  $e$ 는 오차항을 나타낸다.

다음은 직교배열표를 이용하여 특성치에 대한 평균분석 및 분산분석을 수행하는 과정을 설명한다. 4개의 3수준 인자를 A, B, C, D라 하고 각 수준에서의 값을 결정한 후  $L_9(3^4)$ 를 이용하여 행렬 실험을 수행한다. 인자 수준에 의해 정의되는 실험 영역에 대한 특성치  $\eta$ 의 전체평균은 다음과 같이 주어진다.

$$m = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 \eta_i \quad (2)$$

각 인자의 수준에 대한 실험치 영향을 파악하기 위하여 평균분석을 수행한다. A 인자의  $A_1$ 에 대한 평균을 구하면 다음과 같다.

$$m_{A_1} = \frac{1}{3} (\eta_1 + \eta_2 + \eta_3) \quad (3)$$

특성치에 대한 최적수준은 각 인자의 수준별 평균값이 최대가 되는 인자들의 조합으로 구해진다. 제곱합은 그 인자의 수준별 평균치와 전체 평균치 사이의 편차를 제곱하여 합한 것으로 인자 A의 경우

$$\begin{aligned} \text{Sum of squares due to factor A} &= 3(m_{A_1} - m)^2 + 3(m_{A_2} - m)^2 + 3(m_{A_3} - m)^2 \quad (4) \\ &= \sum_{i=1}^3 3(m_{A_i} - m)^2 \end{aligned}$$

이 된다. 제곱합은 구조설계에서 정해진 구간 안

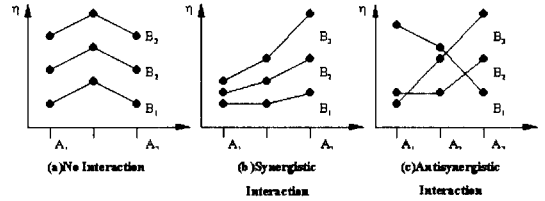


Fig. 1 Examples of interaction

에서의 설계목적에 대한 구간 민감도의 의미를 갖는다.

### 3. 교호작용

#### 3.1 교호작용의 정의

실험계획법에서 2 인자 이상의 특정한 인자수준의 조합에서 일어나는 효과를 교호작용이라 부른다.<sup>(7,11)</sup> 예를 들면, 인자 A의 효과가 인자 B의 수준의 변화에 따라 변화하는 경우에 A, B 인자간에 교호작용  $A \times B$ 가 존재한다고 볼 수 있다. 시스템의 응답 특성치  $\eta$ 가 인자 A, B의 수준에 따라 변하므로  $\eta$ 를  $A_i, B_j$ 의 함수로 볼 때  $\eta = f(A_i, B_j)$ 으로 표현할 수 있었는데, 만약 모든  $i, j$ 에 대하여 어떤 함수  $h, g$ 가 존재하여

$$\eta = f(A_i, B_j) = h(A_i) + g(B_j) \quad (5)$$

과 같이 표현되면 A, B 간에 교호작용은 존재하지 않는다. 즉 응답과 인자 수준과의 관계를 근사적으로 나타내기 위해서 필요한 가법 모델의 성립을 의미한다. 그러나 식 (5)가 성립하지 않으면 교호작용이 있다고 말한다.

Fig. 1(a)는 인자 A, B 사이에 교호작용이 없는 경우를 보여주고 있으며 식 (1)과 같은 가법모델이 완벽하게 일치하는 모델이 된다. Fig. 1(b)와 Fig. 1(c)는 교호작용이 존재하는 두 가지 예를 보여주고 있다. Fig. 1(b)는 동향적 교호작용(synergistic interaction)으로서 각 선들은 평행하지는 않지만  $\eta$ 의 변화방향은 일치하며 이 경우 가법모델로부터 찾아낸 최적 수준은 타당성을 갖는다. 반면에 Fig. 1(c)는 반향적 교호작용(antisynergistic interaction)으로서 선들이 평행하지 않을 뿐 아니라  $\eta$ 의 변화방향도 일관성이 없다. 이 경우는 가법모델의 적용으로 최적조건을 잘못 판단할 수 있다. 그러므로 교호작용  $A \times B$ 가 유의한 경우에는 수준의 조합  $A_i B_j$ 에서 모평균을 추정하는 것이 실제로 의미가 크다고 볼 수 있다.

**Table 1** Assignment of factors and interactions: experiment layout using array  $L_8(2^7)$

Expt. No.	Column						
	1	2	3	4	5	6	7
1	B <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>		C <sub>1</sub>			D <sub>1</sub>
2	B <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>		C <sub>2</sub>			D <sub>2</sub>
3	B <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>		C <sub>1</sub>			D <sub>2</sub>
4	B <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>		C <sub>2</sub>			D <sub>1</sub>
5	B <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>		C <sub>1</sub>			D <sub>2</sub>
6	B <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>		C <sub>2</sub>			D <sub>1</sub>
7	B <sub>2</sub>	A <sub>2</sub>		C <sub>1</sub>			D <sub>1</sub>
8	B <sub>2</sub>	A <sub>2</sub>		C <sub>2</sub>			D <sub>2</sub>
	B	A	A×B	C	B×C	B×D	D
	Factor assignment						

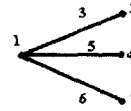
**Table 2** Interaction Table for  $L_8(2^7)$

Column	Column						
	1	2	3	4	5	6	7
1	(1)	3	2	4	4	7	6
2		(2)	1	6	7	4	5
3			(3)	7	6	5	4
4				(4)	1	2	3
5					(5)	3	2
6						(6)	1
7							(7)

구조물 설계시 특성치에 대하여 설계변수 사이에 존재하는 교호작용은 대체로 동향적 교호작용으로 분류할 수 있지만 인자 수준을 적절히 선택하지 못했거나, 목적함수를 잘못 선정했을 때 반향적 교호작용이 발생할 가능성이 있다. 실제 문제에서 완벽하게 교호작용이 존재하지 않는 모델을 구성하는 것은 불가능하며 오히려 이러한 설계변수나 인자들간 작용의 성향이나 크기를 측정할 수 있다면, 직교배열표를 사용하여 이를 설계에 반영하는 것이 바람직하다.

3.2 교호작용을 고려한 직교배열표의 구성

3 인자 이상의 고차의 교호작용은 일반적으로 기술적인 의미가 적다고 말할 수 있다. 주효과와 2 인자 교호작용만의 추정이나 검정을 할 뿐이라면 인자의 모든 조합에서 실험할 필요가 없는 일부실시법이 사용되고 있다. 일부실시법의 배치는 교략법의 배치로부터 간단히 유도될 수 있으며 대개의 경우 직교배열표를 이용하여 이루어진다. 직교배열표에 인자들과 교호작용을 배치 할 때 인자와 교호작용의 효과를 서로 분리할 수 없게 배치하는 경우를 교략이라 하며 직교배열표상에서 특정한 두 인자 사이의 교호작용을 추정하기 위해서는 교략된 인자의 열을 사용하지 말아야 한다. Taguchi 가 개발한 선점도법(linear graph technique)과 교호작용표(interaction table)를 이용하면 교호작용을 고려한 직교배열표를 계획하는데 편리하다.



**Fig. 2** Linear graph for  $L_8(2^7)$

**Table 3** 2-way table to estimate A×B interaction

		Level of factor B	
		B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>
Level of factor A	A <sub>1</sub>	$(\eta_1 + \eta_2) / 2$	$(\eta_5 + \eta_6) / 2$
	A <sub>2</sub>	$(\eta_3 + \eta_4) / 2$	$(\eta_7 + \eta_8) / 2$

이에 대한 예로써 4 개의 2 수준 인자 A, B, C, D에 대해서 Table 2에 나타낸  $L_8$  교호작용표와 Fig. 2의 선점도를 참고하여 특정한 두 인자(1 열×2 열, 1 열×4 열, 1 열×7 열) 사이의 교호작용을 추정하기 위해서 비워야 할 열(3 열, 4 열, 7 열)들을 Table 1과 같이 결정할 수 있다.

3.3 교호작용 효과의 추정

교호작용을 추정한다는 것은 인자효과 사이의 비평행성을 평가하는 것을 의미한다. 교호작용을 추정하기 위해서는 측정된 데이터로부터 Table 3과 같은 2 원표(two-way table)를 작성한다. 2 원표를 쓰는 이유는 교호작용을 분리하여 구할 수 있고, 인자의 효과(주효과)에 대한 검출이 좋아지고 실험오차를 단독으로 구할 수 있기 때문이다. 앞의 직교배열표 Table 1에 대해 교호작용 A×B를 추정하기 위하여 행에 인자 A의 수준을 나타내고 열에는 인자 B의 수준을 나타내어 Table 3과 같은 이원표를 작성할 수 있다. 이때 표에 들어갈 자료는 인자 A, B의 조합에 대한 데이터 평균이며  $\eta_i$ 는 i 번째 실험결과를 나타낸다.

4. 교호작용을 고려한 구조물 설계

4.1 설계 방법

4.1.1 문제 설정

행렬 실험에서는 인자와 수준을 고려하게 된다. 최적설계의 설계변수는 인자에 해당되며 모든 제품은 사용자의 요구에 대한 성능 특성치를 갖고 있으며 이는 최적설계문제에서 목적함수와 일치한다. 인자의 실험조건에 해당하는 수준은 기존 공정이나 설계변수에서 사용되고 있는 것으로 선택한다. 2 수준은 보통 선형효과를 파악하는 경우에

Table 4 Degrees of freedom

Factor	Degrees of freedom
Overall mean	1
A	2 - 1 = 1
B, C, D, E, F	5 × (3 - 1) = 10
A × B	(2 - 1) × (3 - 1) = 2
Total	14

쓰이며 3 수준은 비선형성 즉 곡률효과와 최대값에 대한 정보가 요구될 때 사용되는데 3 수준을 선호하는 편이다.

문제 설정 단계에서 기술적 지식, 제조상의 정보 등을 토대로 교호작용의 존재를 확인할 수 있다면, 곧바로 교호작용을 고려한 행렬실험을 실시할 수 있다. 그렇지 못한 경우는 교호작용을 고려하지 않은 행렬실험을 통해 나온 결과들에 대한 가산성 평가를 실시하여 교호작용 존재 여부를 알 수 있다.

4.1.2 교호작용을 고려하지 않은 행렬 실험

행렬실험에서 사용할 직교배열표는 인자의 수, 각 인자의 수준 수, 그리고 추정하고자 하는 교호작용을 고려하여 적절하게 구성한다. 직교배열표를 선택하는 첫 단계로서 필요한 최소한의 실험횟수를 나타내는 총 자유도를 계산한다.

2수준 인자 1개(A)와 3수준 인자 5개(B, C, D, E, F)가 있고 교호작용 A×B 를 고려하고자 할 때, 이 실험의 자유도는 Table 4 와 같이 계산한다.

행렬실험을 수행 후 결과 값들에 대해 평균분석과 분산분석을 수행하고 최적수준을 결정한다. 최적 조건하에서의 평균분석에 의해 추정된 예측치와 실험에 의한 측정치를 비교하여 가산성 평가를 실시한다. 두 값의 차이가 식 (6)과 같이 추정 오차분산에 의한 95%신뢰도 범위를 만족하면 가법모델이 성립하며 인자들간의 교호작용은 거의 없다고 간주한다. 직교배열표를 사용한 실험계획에서는 오차변동이 상당히 크게 나오는 경우가 많으므로 신뢰율 90%를 사용하기도 하며 예제 4.2.2 와 4.2.3 에서 실제 적용하였다.

$$|\eta_{opt}^{pred} - \eta_{opt}^{exp}| \leq 2\sigma_{pred} \quad (6)$$

여기서  $\eta_{opt}^{pred}$  는 최적수준에서 추정된 예측치,  $\eta_{opt}^{exp}$  는 측정치이고  $\sigma_{pred}$  는 예측오차의 편차를 나타낸다. 반대로 가산성을 만족하지 않는 경우는 행렬실험에서 간주한 가법모델에 오류가 있는 것으로 교호작용을 고려해 주어야 한다.

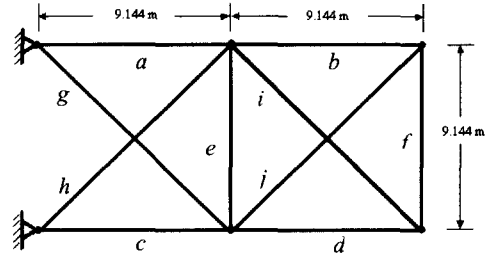


Fig. 3 Ten bar truss

4.1.3 교호작용을 고려한 행렬실험

앞서 행한 행렬실험에 대한 가산성이 성립하지 않거나 몇몇 교호작용을 선택적으로 추정해야 할 경우가 있다. 여기서 선정된 교호작용은 기술적 지식, 제조상의 정보 등을 토대로 하여 얻어지는데 본 논문의 예제에서는 인자들의 특성치에 대한 구간민감도에 해당하는 제곱합 값을 기준으로 교호작용을 선정하였다. 교호작용표와 선점도법을 이용하여 교호작용을 고려한 직교배열표를 계획할 수 있으며 행렬실험을 통한 결과 값들에 대한 분산분석을 통해서 특성치에 대한 인자 효과와 유의한 교호작용을 추정할 수 있다. 특성치를 최대화하는 실험조건은 일원표(one-way table)와 이원표를 통하여 구할 수 있으며 이때 3 인자 이상의 교호작용은 없는 것으로 가정한다.

4.1.4 각 행렬실험 결과 비교 및 최적수준 선정

지금까지 행한 교호작용 고려 여부에 따른 행렬실험들의 최적값을 비교하고 각 행렬실험의 행에서 최선에 해당되는 값들과도 비교하여 최적수준을 선정하게 된다.

4.2 적용 예제

예제로는 10 부재 트러스, 25 부재 전송탑 및 5 부재 트러스의 설계문제를 제시하였다. 각 예제에서 행렬실험에 의한 최적해의 평가를 위해 전조합 실시법을 수행하여 구한 최적해와 비교하였으며 물성치는 탄성계수(E) 70GPa, 포아송비( $\nu$ ) 0.33, 밀도( $\rho$ ) 2770kg/m<sup>3</sup>을 사용하였다.

모든 예제에서 목적함수에 대한 설계의 정식을 다음과 같이 설정하였다.

find optimum level  
to maximize 1st natural frequency (7)

**Table 5** Factors and their levels ( $\times 10^{-4}m^2$ )

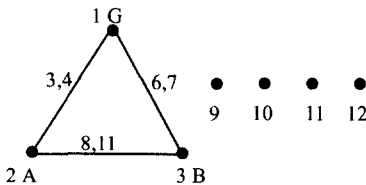
Level	Factors(Design Variables)				
	A	B	E	G	I
1	6.452	6.452	6.452	6.452	6.452
2	70.968	70.968	70.968	70.968	70.968
3	135.484	135.484	135.484	135.484	135.484

**Table 6** Experiment layout using array  $L_{18}$

Expt. No.	Column Number and Factor Assigned									Results $\eta$ (Hz)
	1	2	3	4	5	6	7	8		
	e	A	B	E	G	I	e	E		
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	15.1791
2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	5.9394
3	1	1	3	3	3	3	3	3	3	4.3649
4	1	2	1	1	2	2	3	3	3	18.1086
5	1	2	2	2	3	3	1	1	1	14.3798
6	1	2	3	3	1	1	2	2	2	6.3710
7	1	3	1	2	1	3	2	3	3	6.8829
8	1	3	2	3	2	1	3	1	1	11.5634
9	1	3	3	1	3	2	1	2	2	19.6754
10	2	1	1	3	3	2	2	1	1	5.6706
11	2	1	2	1	1	3	3	2	2	4.9093
12	2	1	3	2	2	1	1	3	3	5.7910
13	2	2	1	2	3	1	3	2	2	15.2216
14	2	2	2	3	1	2	1	3	3	6.6922
15	2	2	3	1	2	3	2	1	1	13.6101
16	2	3	1	3	2	3	1	2	2	11.7610
17	2	3	2	1	3	1	2	3	3	20.1153
18	2	3	3	2	1	2	3	1	1	6.6950

**Table 7** Analysis of  $\eta$  (Hz)

Number of row	Factor	Level Means			Degrees of Freedom	Sum of Squares
		1	2	3		
1	Error	11.3850	10.0518		1	7.9979
2	A	6.9757	12.3972	12.7822	2	126.5106
3	B	12.1373	10.5999	9.4179	2	22.3117
4	E	13.2663	9.1516	7.7372	2	192.1537
5	G	7.7883	11.1289	13.2379	2	90.6137
6	I	12.3796	10.4635	9.3180	2	28.5941
7	Error	12.2464	9.7649	10.1438	2	21.4448
8	Error	11.1830	10.6463	10.3258	2	2.2510



**Fig. 4** A standard linear graph of  $L_{27}(3^{13})$

4.2.1 10 부재 트러스

수준별 인자의 수치는 해당되는 설계변수에 부여된 상한과 하한을 고려하여 Table 5 와 같이 설정하

였다. 이 구조물이 대칭인 구조물인 점을 감안하여 인자별로 묶음으로써 설계자의 선택에 따라 인자 수를 10 개에서 5 개: A(a, c), B(b, d), E(e, f), G(g, h), I(i, j) 로 줄일 수 있다. 자유도는 11 이며 3 수준 인자가 5 개인 점을 감안하여  $L_{18}(2^1 \times 3^3)$  표준 직교배열표를 선택하여 인자들을 배치한 후 Table 6 과 같이 교호작용을 고려하지 않은 행렬실험을 수행한다.

최적수준과 분석결과는 Table 7 와 같다. 1 차 고유진동수에 대해서는 단면적 A, E, G 가 비교적 영향력이 큰 인자임을 알 수 있다. 평균분석을 통해서 예측된 최적조합은  $A_3B_1E_1G_3I_1$  이다.

최적조합  $A_3B_1E_1G_3I_1$  에서 예측치는 22.9238Hz 이고, 실험에 의한 측정치는 32.4099Hz 이다. 이 예제에서는 예측치와 측정치의 차이는 9.4861 이고 Table 7 로부터  $2\sigma_{pred}$  은 3.9363 이므로 95%신뢰도 범위( $2\sigma_{pred}$ )에서 가산성이 성립하지 않을 가능성, 즉 교호작용이 존재할 가능성을 고려해야 한다.

예제에서는 교호작용에 대해 주어진 정보가 없으므로 여기서는 주어진 수준에서 제곱합이 비교적 큰 인자 A, B, G 사이에서 교호작용이 일어날 가능성이 크다고 보고 각 인자들 사이의 2 인자 교호작용을 선정하였다. 고려된 인자와 교호작용에 대한 자유도를 구하면 23 이 되며 Table 8 에서와 같이 직교배열표  $L_{27}(3^{13})$ 를 선택한다. 3 수준일 때 2 인자 교호작용은 자유도가 4 가 되므로 2 개의 열에 배치되어야 한다. 인자와 교호작용을 배치하기 위하여 교호작용표나 Fig. 4 과 같은 표준선점도를(standard linear graph) 이용한다.

행렬실험에 대한 결과는 Table 9 에 나타나 있으며 교호작용  $G \times A$  가 유의하다고 판단되므로 Table 10 을 작성하여 그 값을 최적수준 선정에 반영하고 나머지 교호작용들은 상대적으로 크기가 대단히 작기 때문에 무시한다. 인자 A, G 사이에 강한 반향적 교호작용이 있음을 확인 할 수 있다.

지금까지 구한 결과들을 전조합 실시법에 의한 최적수준과 비교해 보았다. 전조합 실시법을 할 때 요구되는 실험 횟수는 3 수준 5 인자 이므로  $3^5$  인 243 회의 실험을 수행한다. 실험 결과 최적수준 조합  $A_3B_1E_1G_3I_1$  을 얻을 수 있었으며 이때의 진동수는 32.4099Hz 가 된다. Table 10 으로부터 교호작용을 고려할 때와 고려하지 않을 때 행렬실험을 통해서 구한 최적수준이 전조합 실시법에서 구한 최적수준과 동일함을 알 수 있다. 이 최적수준은  $L_{18}$  과  $L_{27}$  직교배열표 임의의 행에서의 진동수보다 더 큰 값을 가진다는 것을 알 수 있다.

Table 8 Experiment layout using array L<sub>27</sub>

Expt. No.	Column Number and Factor Assigned													Results $\eta$ (Hz)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
	E	A	EA	EA <sup>2</sup>	G	EG	EG <sup>2</sup>	AG	$\epsilon$	B	AG <sup>2</sup>	I	E	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	15.1791
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	6.9308
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	5.1391
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3	7.1481
5	1	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	13.9615
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	18.7183
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2	7.4134
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3	15.0993
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	20.1153
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	4.5421
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1	5.5798
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2	6.6958
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2	10.4728
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3	15.1791
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1	13.3847
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1	6.4703
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2	12.0962
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	16.3365
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	4.0141
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3	5.0787
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1	5.6706
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1	6.1299
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	10.7862
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3	11.1375
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3	8.0745
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1	15.5947
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2	15.1791

Table 9 Analysis of  $\eta$  (Hz)

Number of row	Factor	Level Means			Degrees of Freedom	Sum of Squares
		1	2	3		
1	G	7.4497	12.9013	13.8005	2	212.5862
2	A	6.4869	13.1456	14.5191	2	332.2238
3	GA	11.8534	11.7420	10.5561	2	9.3048
4	GA <sup>2</sup>	16.3660	8.9989	8.7866	2	335.3043
5	B	14.2676	10.3090	9.5749	2	114.6943
6	GB	11.6863	11.1824	11.2827	2	1.2808
7	GB <sup>2</sup>	10.4970	11.6764	11.9781	2	11.0275
8	AB	10.5639	11.7633	11.8242	2	9.0920
9	Error	10.8213	11.3723	11.9579	2	5.8157
10	E	15.2380	9.9694	8.9440	2	205.2689
11	AB <sup>2</sup>	11.6463	11.1091	11.3961	2	1.3009
12	I	14.0356	10.6838	9.4321	2	101.9786
13	Error	10.8731	11.4961	11.7823	2	3.8904

Table 10 2-way table to estimate G×A (Hz)

		Level of factor G		
		G1	G2	G3
Level of factor A	A1	8.0045	5.7652	5.6909
	A2	7.1846	18.8175	13.4346
	A3	7.1600	14.1211	22.2761

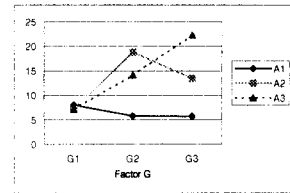


Fig. 5 Interaction between factors A and G

Table 11 The optimum level

Factor		A	B	E	G	I	Results $\eta$ (Hz)
Opt. Level	Full factorial	3	1	1	3	1	32.4099
	L <sub>18</sub>	3	1	1	3	1	32.4099
	L <sub>27</sub>	3	1	1	3	1	32.4099

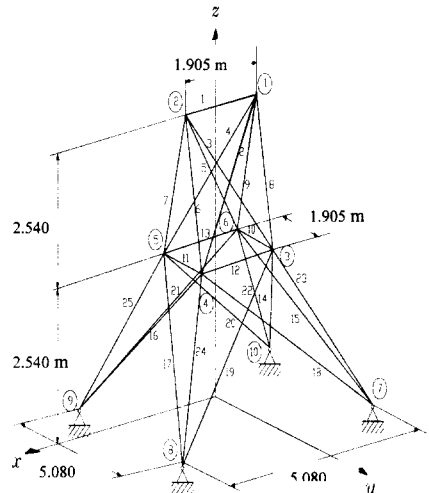


Fig. 6 25-member transmission tower

4.2.2 25부재 전송탑

수준별 인자의 수치는 해당하는 설계변수에 부여된 상한과 하한을 고려하여 Table 11 과 같이 설정하였다. 이 구조물 역시 대칭인 것을 감안하여 설계변수를 25(1 - 25)개에서 7(A - G)개로 줄여 주었다. 자유도는 15 이며 표준 직교배열표 중에서 L<sub>18</sub>(2<sup>1</sup>×3<sup>7</sup>)를 선택하여 교호작용을 고려하지 않고 Table 12 와 같은 행렬실험을 수행한다. 분석결과와 최적수준은 Table 13 에 나타나 있으며 최적수준조합 A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>C<sub>1</sub>D<sub>1</sub>E<sub>3</sub>F<sub>3</sub>G<sub>3</sub> 에서 진동수의 예측치  $\eta_{opt}^{pred}$  는 92.2675Hz 이고 실험에 의한 측정치  $\eta_{opt}^{exp}$  은 119.605 Hz 이다. 90% 신뢰도 범위에서  $2\sigma_{pred}$  는 12.408 이고  $|\eta_{opt}^{pred} - \eta_{opt}^{exp}|$  는 27.3370 이므로 가산성이 성립하지 않음을 알 수 있다.

Table 12 Factors and their levels ( $\times 10^{-4}m^2$ )

Level	Factors (Design Variables)						
	A (1)	B (2,3,4,5)	C (6,7,8,9)	D (10,11, 12,13)	E (14,15, 16,17)	F (18,19, 20,21)	G (22,23, 24,25)
1	0.0645	1.9355	1.9355	0.0645	0.6452	1.9355	1.9355
2	0.3226	9.6774	9.6774	0.3226	4.8387	6.4516	9.6774
3	0.6452	16.1290	19.3548	0.6452	9.6774	12.9032	19.3548

Table 13 Experiment layout using array  $L_{18}$

Expt. No.	Column Number and Factor Assigned								Results $\eta$ (Hz)
	1 e	2 A	3 B	4 C	5 D	6 E	7 F	8 G	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	70.2834
2	1	1	2	2	2	2	2	2	72.6573
3	1	1	3	3	3	3	3	3	74.8034
4	1	2	1	1	2	2	3	3	101.5664
5	1	2	2	2	3	3	1	1	40.7254
6	1	2	3	3	1	1	2	2	37.2171
7	1	3	1	2	1	3	2	3	84.0617
8	1	3	2	3	2	1	3	1	29.9170
9	1	3	3	1	3	2	1	2	60.2588
10	2	1	1	3	3	2	2	1	38.2930
11	2	1	2	1	1	3	3	2	74.8041
12	2	1	3	2	2	1	1	3	39.5527
13	2	2	1	2	3	1	3	2	42.8188
14	2	2	2	3	1	2	1	3	55.1804
15	2	2	3	1	2	3	2	1	39.2377
16	2	3	1	3	2	3	1	2	54.8642
17	2	3	2	1	3	1	2	3	41.6263
18	2	3	3	2	1	2	3	1	33.4789

Table 14 Analysis of  $\eta$  (Hz)

Number of row	Factor	Level Means			Degrees of Freedom	Sum of Squares
		1	2	3		
1	Error	63.4989	46.6507		1	1277.3901
2	A	61.7523	52.7909	50.7012	2	412.0023
3	B	63.3145	52.4850	47.4248	2	1020.4973
4	C	64.6294	52.2157	48.3792	2	865.7785
5	D	59.1709	56.2992	49.7543	2	279.5105
6	E	43.5691	60.2391	61.4166	2	1195.5679
7	F	53.4774	52.1821	59.5648	2	186.4709
8	G	41.9892	57.1033	66.4318	2	1785.6279

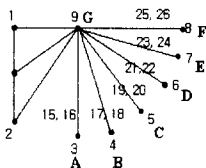


Fig. 7 A standard linear graph of  $L_{54}(2^1 \times 3^{25})$

Table 15 Analysis of  $\eta$  (Hz)

Number of row	Factor	Level Means			Degrees of Freedom	Sum of Squares
		1	2	3		
1	Empty	55.7258	53.7713		1	51.5743
2	error	60.5345	53.0336	50.6776	2	953.8351
3	A	56.8932	56.3164	51.2410	2	333.4139
4	B	61.7723	54.3996	46.4728	2	2573.9197
5	C	64.6294	53.0561	47.9962	2	2155.9311
6	D	52.1166	52.7039	59.7233	2	593.6176
7	E	41.4651	58.0184	64.7622	2	5173.4639
8	F	52.2946	58.6346	53.2965	2	420.9783
9	G	41.5449	60.5547	67.4343	2	4729.8753
10 - 14	Error				10	77.1412
15, 16	G×A				4	38.4267
17, 18	G×B				4	116.6668
19, 20	G×C				4	110.8000
21, 22	G×D				4	53.5625
23, 24	G×E				4	1937.8171
25, 26	G×F				4	501.6189

Table 16 2-way table to estimate  $G \times E$  (Hz)

		Level of factor G		
		G1	G2	G3
Level of factor E	E1	39.3468	45.4366	39.6119
	E2	40.5231	64.4816	69.0504
	E3	44.7648	71.7459	77.7789

Table 17 2-way table to estimate  $G \times F$  (Hz)

		Level of factor G		
		G1	G2	G3
Level of factor F	F1	43.8747	58.6527	54.3563
	F2	41.6863	65.2108	69.0666
	F3	39.0737	57.8006	63.0152

Table 18 The optimum Level

Factor		A	B	C	D	E	F	G	Results $\eta$ (Hz)
Opt. Level	Full factorial	1	1	1	3	3	3	3	119.7351
	$L_{18}$	1	1	1	1	3	3	3	119.6044
	$L_{54}$	1	1	1	3	2	3	3	108.8332

교호작용이 존재한다고 판단되므로 이것을 고려해준 행렬실험을 수행한다. 진동수에 대해 제곱합이 큰 G 인자를 중심으로 6 개의 2 인자 교호작용을 고려해 주었다. 자유도가 39 이므로 직교배열표  $L_{54}(2^1 \times 3^{25})$ 를 선택하고 Fig. 7 선점도에 따라 인자 와 교호작용을 교락없이 배치하여 행렬실험을 수행한다. Table 14 에서 교호작용  $G \times E$ ,  $G \times F$  가 유의하다고 판단되므로 각 경우에 대한 이원표 Table 15, 16 을 작성하여 그 값들을 최적수준 선정에 반영하였다. 인자 E, G 사이에 반향적 교호작용



이 있음을 확인 할 수 있다.

3 수준 7 인자에 대한 전조합 실시법은 실험 횟수가  $3^7$  인 2187 회의 실험을 수행하게 된다. Table 17 에서 교호작용을 고려한 직교배열표  $L_{54}$  의 최적해가 교호작용을 고려하지 않은  $L_{18}$  의 최적해보다 좋지 않음을 알 수 있는데 이것은 직교배열표를 이용하여 행렬실험을 설계하는 단계에서 유의한 교호작용이 제대로 선정되지 못했기 때문이며 상대적으로  $L_{18}$  직교배열표에서 구한 최적해가 좋은 이유는 교호작용이 각 열에 고르게 분산되어 교락되는 혼합 직교배열표의 특징에 기인한 것이라 판단된다. 선정된 최적수준은  $L_{18}$  과  $L_{54}$  직교배열표 임의의 행에서의 진동수보다 더 큰 값을 가진다는 것을 알 수 있다.

4.2.3 5 부재 트러스

교호작용을 뚜렷이 나타나도록 하기위해 설계 변수 C 의 수준을 편기(bias)시켰다. 자유도는 11 이며 Table 19 와 같이 표준 직교배열표  $L_{18}(2^1 \times 3^7)$  를 선택하여 교호작용을 고려하지 않은 행렬실험을 수행한다. 분석결과와 최적수준은 Table 20 에 나타나 있으며 최적수준조합  $A_3B_3C_2D_2E_3$  에 의한 진동수의 예측치와 실측치의 차이  $|\eta_{opt}^{pred} - \eta_{opt}^{exp}|$  는 3.0375 이고 90% 신뢰도 범위에서  $2\sigma_{pred}$  는 2.0653 이므로 가산성이 성립하지 않는다.

1 차 고유진동수에 대해 제곱합이 큰 A 인자와 나머지 인자들과의 4 개의 2 인자 교호작용을 고려해 주었다. 자유도가 27 이므로 Table 21 에서처럼  $L_{27}(3^{13})$  을 선택하고 Fig. 9 와 같은 선점도에 따라 인자와 교호작용을 교락없이 배치하여 행렬실험을 수행한다. 행렬실험에 대한 결과는 Table 22 에 나타나 있으며 진동에 대한 제곱합을 구한 결과 교호작용 A×E 가 유의하다고 판단되므로 Table 23 을 작성하여 그 값을 최적수준 선정에 반영하였다.

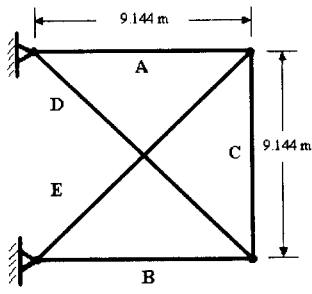


Fig. 8 Five bar truss

Table 19 Factors and their levels ( $\times 10^{-4}m^2$ )

Level	Factors				
	A	B	C	D	E
1	3.00	8.00	10.10	10.00	6.00
2	17.00	17.00	11.00	25.00	18.00
3	30.00	26.00	20.00	40.00	30.00

Table 20 Experiment layout using array  $L_{18}$

Expt. No.	Column Number and Factor Assigned								Results $\eta$ (Hz)
	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	e	A	B	C	D	E	e	e	34.40398
2	1	1	2	2	2	2	2	2	34.80376
3	1	1	3	3	3	3	3	3	31.75859
4	1	2	1	1	2	2	3	3	38.07272
5	1	2	2	2	3	3	1	1	40.39151
6	1	2	3	3	1	1	2	2	29.83928
7	1	3	1	2	1	3	2	3	41.13371
8	1	3	2	3	2	1	3	1	32.97368
9	1	3	3	1	3	2	1	2	42.08462
10	2	1	1	3	3	2	2	1	27.82737
11	2	1	2	1	1	3	3	2	28.18135
12	2	1	3	2	2	1	1	3	39.06658
13	2	2	1	2	3	1	3	2	31.56198
14	2	2	2	3	1	2	1	3	34.98063
15	2	2	3	1	2	3	2	1	42.04833
16	2	3	1	3	2	3	1	2	36.60479
17	2	3	2	1	3	1	2	3	36.44593
18	2	3	3	2	1	2	3	1	37.88146

Table 21 Analysis of  $\eta$  (Hz)

Number of row	Factor	Level Means			Degrees of Freedom	Sum of Squares
		1	2	3		
1	Error	36.1624	34.9554		1	6.5563
2	A	32.6736	36.1491	37.8540	2	83.6452
3	B	34.9341	34.6295	37.1131	2	22.0193
4	C	36.8728	37.4732	32.3307	2	94.8716
5	D	34.4034	37.2616	35.0117	2	27.2039
6	E	34.0486	35.9418	36.6864	2	22.1933
7	Error	37.9220	35.3497	33.4049	2	61.6051
8	Error	35.9211	33.8460	36.9100	2	29.3397

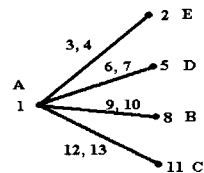


Fig. 9 A standard linear graph for  $L_{27}(3^{13})$

Table 22 Experiment layout using array L<sub>27</sub>

Expt. No.	Column Number and Factor Assigned												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	A	E	AE	AE <sup>2</sup>	D	AD	AD <sup>2</sup>	B	AB	AB <sup>2</sup>	C	AC	AC <sup>2</sup>
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

Table 23 Analysis of η (Hz)

Number of row	Factor	Level Means			Degrees of Freedom	Sum of Squares
		1	2	3		
1	A	32.1708	37.3417	37.1169	2	153.7586
2	E	35.8885	35.2282	35.5128	2	1.9740
3, 4	A×E				4	125.7035
5	D	33.9714	36.7381	35.9199	2	36.3627
6, 7	A×D				4	3.3838
8	B	33.3263	36.0655	37.2377	2	72.5306
9, 10	A×B				4	1.9863
11	C	37.2954	35.3867	33.9474	2	50.7720
12, 13	A×C				4	0.7570

Table 24 2-way table to estimate A×E (Hz)

		Level of factor A		
		A1	A2	A3
Level of factor E	E1	36.4251	36.4902	34.7501
	E2	31.2400	37.2814	37.1633
	E3	28.8474	38.2535	39.4374

Table 25 The optimum Level

Factor		A	B	C	D	E	Results η (Hz)
Opt. Level	Full factorial	3	3	1	3	3	43.315
	L <sub>18</sub>	3	3	2	2	3	42.806
	L <sub>27</sub>	3	3	1	2	3	43.140

3 수준 7 인자에 대한 전조합 실시법은 3<sup>5</sup> 인 243 회의 실험을 수행하게 된다. Table 24 에서 알 수 있듯이 L<sub>27</sub> 에서 유의한 교호작용 A×E 이 적절히 고려되었으므로 교호작용을 고려하지 않은 행렬실험 L<sub>18</sub>보다 더 우수한 최적해를 얻을 수 있다. 이 최적수준 역시 L<sub>18</sub> 과 L<sub>27</sub> 직교배열표 임의의 행보다 더 큰 값을 가진다는 것을 알 수 있다.

### 5. 결론

직교배열표를 적용한 행렬실험으로 인자간 교호작용이 고려된 최적화 문제의 불연속 설계방법을 구조 설계에 적용하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 이산설계변수를 갖는 구조물 설계 시 직교배열표를 도입하여 적은 횟수의 실험으로 최적해를 선정할 수 있었다. 가산성 평가를 실시함으로써 행렬실험의 타당성 여부와 인자간 교호작용 여부를 파악하였다.

(2) 교호작용이 존재한다고 판단되면 특성치에 대해 구간 민감도의 의미를 지니는 인자별 제곱합을 기준으로 교호작용 인자들을 선정하였다. 각 개별 인자와 인자간 교호작용을 적절히 배치한 행렬 실험을 수행함으로써 교호작용을 추정할 수 있으며 이원표와 평균분석을 통해 최적수준을 선정할 수 있다.

(3) 5 부재 트러스에서처럼 유의한 교호작용이 적절히 반영된다면 교호작용을 고려하지 않았을 때 보다 더 좋은 최적해를 구할 수 있다. 그러나 25 부재 전송탑에서와 같이 교호작용이 제대로 반영되지 않은 경우는 최적해의 값을 제대로 산출할 수 없다.

(4) 각 예제에 대해 교호작용이 고려되지 않은 L<sub>18</sub> 직교배열표를 적용하여 비교적 우수한 최적해를 얻을 수 있었다. 이것은 혼합 직교배열표에서 임의의 두 열 사이의 교호작용은 나머지 열과 부분적으로 교락되어 있는 특징에서 기인된 것이며 교호작용의 존재 여부가 불확실하거나 크지 않다고 판단될 때는 L<sub>18</sub> 과 같은 혼합 직교배열표를 선택하는 것이 최적해 산출에 효율적임을 알 수 있다.

### 후 기

이 연구는 한국과학기술재단 지정 최적설계신기술센터의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) 이권희, 박경진, 1998, “제한조건이 있는 문제의 이산설계공간에서의 강건최적설계,” 대한기계학회 대한기계학회논문집(A), 제 22 권, 제 5 호, pp. 728~737.
- (2) Park, G. J., Park, Y. S., and Lee, S. H., 1993, “Comparisons of the Direct and Approximation Method in Structural Optimization,” Proceeding of Pan-Pacific Conference for Computer Engineering, Seoul, Korea, Nov.
- (3) Park, Y. S., Lee, S. H., and Park, G. J., 1995, “A Study of Direct vs Approximation Methods in Structural Optimization,” *Structural Optimization*, Vol. 10, No. 1, pp. 64~66.
- (4) Park, G. J. and Arora, J. S., 1987, “Role of Database Management in Design Optimization System,” *Journal of Aircraft*, Vol. 24, No. 11, pp. 745~750.
- (5) Salajeg-heh, E. and Vanderplaats, G.N., 1993, “Optimum Design of Structures with Discrete Sizing and Shape Variables,” *Structural Optimization*, Vol. 6, No. 2, pp. 79~85.
- (6) Wu, S. J. and Chow, P.T., 1995, “Genetic Algorithms for Nonlinear Mixed Discrete-Integer Optimization Problems Via Meta-Genetic Parameter Optimization,” *Engineering Optimization*, Vol. 24, pp. 137~159.
- (7) Phadke, M. S., 1989, *Quality Engineering Using Robust Design*, Prentice Hall, New Jersey.
- (8) Taguchi, G., 1987, *Systems of Experimental Design* (Vol.1, 2), Kraus International Publications, New York.
- (9) Lee, K. H., Eom, I. S., Park, G. J. and Lee, W. I. 1996, “Robust Design for Unconstrained Optimization Problems Using the Taguchi Method,” *AIAA Journal*, Vol. 34, No. 5, pp. 1059~1063.
- (10) Park, G. J., Hwang, W. J. and Lee, W. I., 1994, “Structural Optimization Post-Process Using Taguchi Method,” *JSME International Journal*, Series A, Vol. 37, pp. 166~172.
- (11) Peace, G. S., 1995, *Taguchi Methods: A Hands-On Approach*, Addison Wesley, Massachusetts.