

# 이산공간에서의 구조물 설계시 교호작용에 대한 연구

이권희\* · 황광현\*\* · 권우성\*\*\* · 박경진\*

## Structural Design Considering Interactions in Discrete Design Spaces

K.H. Lee\* · K.H. Hwang\*\* · W.S. Kwon\*\*\* · G.J. Park\*

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

### 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. 서론

최적설계에서 설계 변수는 연속설계변수와 이산설계변수로 분류되어 진다. 연속설계변수의 최적해는 우수한 결과를 제공하지만 실제 적용 시 최적해의 결과를 이산값으로 대치하여 사용해야 하는 경우가 많다. 이산설계변수는 어떤 특정한 값들 중에서 선정되거나 규격화되어 있는 경우로, 연속 설계공간에서의 최적해보다 한 단계 높은 값을 선정하여 적용하고 있다. 이 방법은 구조물의 경량화에 반하는 해를 선정하게 되고 제한 조건을 위배할 가능성이 있다. 따라서 설계 과정 중에 설계변수를 이산 값으로 취급하는 이산설계법이 요구되고 있다.<sup>(1-3)</sup>

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<sup>(5)</sup>을 Wu 등<sup>(6)</sup>

은 유전 알고리즘을 이용하여 이산설계변수를 처리하였다. 이러한 방법들은 계산횟수의 급격한 증가로 인해 구조최적설계 시 설계비용 증가라는 문제에 직면하게 된다. 이산설계변수가 사용되는 다른 방법은 전조합실험법을 이용하는 것으로, 설계변수 범위 내에서 가장 정확한 값을 얻을 수 있지만 실험횟수가 증가한다는 단점이 있다. 반면 일부실험법은 많은 설계변수를 사용할 수 있고, 이산 설계변수를 이용한 효율적인 최적 설계를 수행할 수 있다.<sup>(7-11)</sup>

일부실험법중의 하나인 직교배열표를 사용하는 경우, 설계변수에 해당하는 물리적인 인자(factor)들의 적정한 수준(level)과 각각의 중요도를 파악하면 효율적으로 설계에 접근할 수 있다. 직교배열표에 의한 실험계획법에서는 특성치에 대한 설계변수들의 상호작용을 교호작용이라고 한다. 이러한 상호작용의 영향이 설계목적에 반항적인 경향을 가진다면 트레이드오프(Trade-off)현상이 발생한다. 일반적으로 구조물 설계 시 교호작용 등에 대한 고찰이 없었다. 각 개별 인자의 기여도는 작더라도 인자간 교호작용의 기여도가 큰 경우에는 무시할 수 없다. 따라서 설계변수의 최적수준과

\* 한양대학교 기계공학과

\*\* 한양대학교 기계설계학과

\*\*\* (주) 캄코

기여도에 대한 정보를 획득하는 과정에서 교호작용을 어떻게 이용할 것인가는 중요한 문제가 되고 있다.

본 연구에서는 이산설계공간에서 구조물 설계 시 직교배열표를 이용하여 설계인자들 사이의 교호작용까지 고려할 수 있는 최적설계 방법을 제시하고자 한다. 이것은 실험계획법의 순서를 구조물 설계에 적용한 것으로서 먼저 교호작용을 고려하지 않은 직교배열표를 구성하고 행렬실험을 수행하였으며 교호작용 존재 여부를 판단하기 위하여 제시된 행렬실험 모델에 대한 가산성 평가를 실시하였다. 가산성이 위배되면 교호작용이 존재한다고 보고 이를 고려한 행렬실험을 수행하게 되는데 인자간 교호작용을 선정하기 위한 기준으로는 구간 민감도의 의미를 가지는 제곱합을 이용하였다. 그리고 결과들에 대해 평균분석(ANOM)과 분산분석(ANOVA) 기법을 적용하여 인자와 교호작용의 효과를 추정하고 최적수준을 선정하였다.<sup>(7)</sup> 개발한 설계기법을 검토하기 위하여, 10 부재 트러스, 5 부재 트러스의 설계문제를 예제로 제시하였다.

## 2. 직교배열표를 이용한 실험계획법

공학적 의사결정에 수반되는 인자들에 대한 신뢰성 있는 정보를 얻기 위한 과정에서 실험계획법이 많이 도입되고 있다. 실험 계획법중의 하나인 일부실시법은 불필요한 교호작용이나 고차의 교호작용은 구하지 않고 각 인자의 조합 중에서 일부만 선택하여 실험을 실시한다.<sup>(7)</sup>

그리고 일부실시법의 한 종류인 직교배열표는 교호작용 가운데 기술적으로 생각하여 무시될 수 있는 것을 주효과와 교락시켜 실험의 크기를 줄일 수 있는 실험계획을 짜도록 고안된 표이다. 이러한 직교배열표를 통한 실험계획법이 가지는 제약 조건으로서 설계범위가 한정된다는 점과 회생되는 교호작용이 존재하고 있는가의 여부 혹은 무시할 수 있을 정도로 적은가의 검토가 필요하다.

분산분석은 특성치의 산포를 제곱합으로 나타내고 이 제곱합을 실험과 관련된 요인으로 분해하여 오차에 비해 특히 큰 영향을 주는 요인을 파악할 수 있다. 전체 평균으로부터 그 인자수준에 의한 결과의 편차로 정의되는 인자수준의 효과를 추정하는 것을 평균분석이고, 최적 인자수준의 선정에 반영된다.

행렬실험을 행하는 주요목적은 제품 또는 공정의 설계를 최적화하는 것이다. 어떤 인자의 최적 수준이란 실험영역 내에서 구하고자 하는 특성치

를 최대, 최소 또는 특정값으로 산출하는 수준이다. 인자수준에 따른 특성치의 변동이 가법모델을 따른다면, 주효과와 추정치를 사용하여 최적수준을 결정할 수 있다. 가법 모델은 여러 인자들의 총 효과는 개별 인자효과의 합과 같다는 것을 나타낸다.

## 3. 교호작용

2 인자 이상의 특정한 인자수준의 조합에서 일어나는 효과를 교호작용이라 부른다.<sup>(7, 11)</sup> 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, 모든  $i, j$ 에 대하여 어떤 함수  $h, g$ 가 존재하여

$$\eta = f(A_i, B_j) = h(A_i) + g(B_j) \quad (3-1)$$

과 같이 표현되면 A, B 간에 교호작용은 존재하지 않는다. 즉 응답과 인자 수준과의 관계를 근사적으로 나타내기 위해서 필요한 가법 모델의 성립을 의미한다.

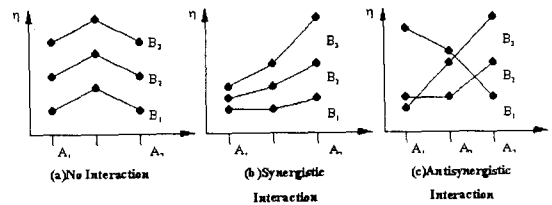


Fig.1 Examples of interaction

구조물 설계 시 특성치에 대하여 설계변수 사이에 존재하는 교호작용은 대체로 Fig.1(b)의 동향적 교호작용으로 분류할 수 있지만 인자 수준을 적절히 선택하지 못했거나, 목적함수를 잘못 선정했을 때 Fig.1(c)와 같은 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.

일부실시법의 배치는 교락법의 배치로부터 유도될 수 있으며 일반적으로 직교배열표를 이용한다. 직교배열표에 인자들과 교호작용을 배치할 때 인자와 교호작용의 효과를 서로 분리할 수 없게 배치하는 경우를 교락이라 하며 직교배열표상

에서 특정한 두 인자사이의 교호작용을 추정하기 위해서는 교락된 인자의 열을 사용하지 말아야 한다. 다구찌가 개발한 선점도법과 교호작용표를 이용하면 교호작용을 고려한 직교배열표를 계획하는데 편리하다.

교호작용을 추정한다는 것은 인자효과 사이의 비평행성을 평가하는 것이다. 교호작용을 추정하기 위해서는 2 원표를 작성한다. 2 원표를 쓰는 이유는 교호작용을 분리하여 구할 수 있고, 인자의 효과에 대한 검출이 좋아지고 실험오차를 단독으로 구할 수 있기 때문이다.

#### 4. 교호작용을 고려한 구조물 설계

##### 4.1 설계 방법

###### 1 단계: 문제 설정

행렬 실험에서는 인자의 실험조건에 해당하는 수준은 기존 공정이나 설계변수에서 사용되고 있는 것으로 선택한다. 기술적 지식, 제조상의 정보 등을 토대로 교호작용의 존재를 확인할 수 있다면, 곧바로 교호작용을 고려한 행렬실험을 실시 할 수 있다. 그렇지 못한 경우는 교호작용을 고려하지 않은 행렬실험을 통해 나온 결과들에 대한 가산성 평가를 실시하여 교호작용 존재 여부를 알 수 있다.

###### 2 단계: 교호작용을 고려하지 않은 행렬 실험

행렬실험에서 사용할 직교배열표는 인자의 수, 각 인자의 수준 수, 그리고 추정하고자 하는 교호작용을 고려하여 구성한다. 행렬실험을 수행 후 결과 값들에 대해 평균분석과 분산분석을 수행하고 최적수준을 결정한다. 최적 조건하에서의 평균 분석에 의해 추정된 예측치와 실험에 의한 측정치를 비교하여 가산성 평가를 실시한다. 두 값의 차이가 식 (4-1)과 같이 추정오차분산에 의한 95%신뢰도 범위를 만족하면 가법모델이 성립하며 인자들간의 교호작용은 없다고 간주한다. 직교배열표를 사용한 실험계획에서는 오차변동이 크게 나오는 경우는 신뢰율 90%를 사용하기도 한다.

$$\left| \eta_{opt}^{pred} - \eta_{opt}^{exp} \right| \leq 2\sigma_{pred} \quad (4-1)$$

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.

###### 3 단계: 교호작용을 고려한 행렬실험

가산성이 성립하지 않거나 교호작용을 선택적으로 추정해야 할 경우, 인자들의 특성치에 대한 구간민감도에 해당하는 제곱합 값을 기준으로 교호작용을 선정한다. 교호작용표와 선점도법을 이용하여 교호작용을 고려한 직교배열표를 계획할 수 있으며 행렬실험을 통한 결과 값들에 대한 분산분석을 통해서 특성치에 대한 인자 효과와 유의한 교호작용을 추정 할 수 있다. 특성치를 최대로 하는 실험조건은 일원표와 이원표를 통하여 구할 수 있으며 이때 3 인자 이상의 교호작용은 없는 것으로 가정한다.

###### 4 단계: 각 행렬실험 결과 비교 및 최적수준 선정

교호작용 고려 여부에 따른 행렬실험들의 최적값을 비교하고 각 행렬실험의 행에서 최선에 해당하는 값들과도 비교하여 최적수준을 선정한다.

##### 4.2 적용 예제

예제로는 10 부재 트러스, 5 부재 트러스의 설계 문제로 물성치는 탄성계수(E) 70GPa, 포아송비( $\nu$ ) 0.33, 밀도( $\rho$ ) 2770kg/m<sup>3</sup>로 행렬실험을 실시하였다. 목적함수에 대한 설계의 정식을 다음 같다.

$$\begin{aligned} & \text{find} && \text{optimum level} \\ & \text{to maximize} && \text{1st natural frequency} \end{aligned} \quad (4-2)$$

###### 4.2.1 10 부재 트러스

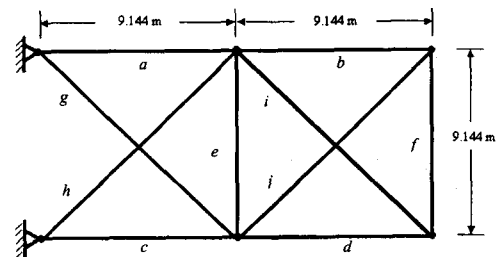


Fig.2 Ten bar truss

인자의 수준은 설계변수에 부여된 상한과 하한을 고려하여 Table 5 와 같이 설정하였다. 이 구조물은 대칭이므로 인자별로 묶어 설계자의 선택에 따라 인자 수를 10 개에서 5 개: A(a, c), B(b, d), E(e, j), G(g, h), I(i, j)로 줄일 수 있다. 자유도는 11 이며 3 수준 인자가 5 개인 점을 감안하여 L<sub>18</sub>(2<sup>1</sup>×3<sup>7</sup>) 표준 직교배열표를 선택하여 인자들을 배치한 후 Table 1 과 같이 교호작용을 고려하지 않은 행렬실험을 수행한다.

**Table 1** 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 2** 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	E	G	I	e	E	15.1791
2	1	1	2	2	2	2	2	2	5.9394
3	1	1	3	3	3	3	3	3	4.3649
4	1	2	1	2	2	3	3	3	18.1086
5	1	2	2	2	3	3	1	1	14.3798
6	1	2	3	3	1	1	2	2	6.3710
7	1	3	1	2	1	3	2	3	6.8829
8	1	3	2	3	2	1	3	1	11.5634
9	1	3	3	1	3	2	1	2	19.6754
10	2	1	1	3	3	2	2	1	5.6706
11	2	1	2	1	1	3	3	2	4.9093
12	2	1	3	2	2	1	1	3	5.7910
13	2	2	1	2	3	1	3	2	15.2216
14	2	2	2	3	1	2	1	3	6.6922
15	2	2	3	1	2	3	2	1	13.6101
16	2	3	1	3	2	3	1	2	11.7610
17	2	3	2	1	3	1	2	3	20.1153
18	2	3	3	2	1	2	3	1	6.6950

**Table 3** Analysis of  $\eta$  (Hz)

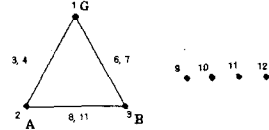
Number of row	Factor	Level Means			Degrees of Freedom	Sum of Squares
		1	2	3		
1	error	11.3850	10.0518		1	7.9979
2	A	6.9757	12.3972	12.7822	2	126.5106
3	B	12.1373	10.5999	9.4179	2	22.3117
4	E	15.2663	9.1516	7.7372	2	192.1537
5	G	7.7883	11.1289	13.2379	2	90.6137
6	I	12.3736	10.4635	9.3180	2	28.5941
7	error	12.2464	9.7649	10.1438	2	21.4448
8	error	11.1830	10.6463	10.3258	2	2.2510

최적수준과 분석결과는 Table 3 과 같다. 1 차 요인동수에 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 3 으로부터  $2\sigma_{pred}$  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 교호작용

에 대한 자유도를 구하면 23 이 되며 Table 4 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. 3 과 같은 표준선점도를 이용한다.



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

**Table 4** Experiment layout using array  $L_{27}$

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	e	B	AG <sup>2</sup>	I	E		
1	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	2	6.9308
3	1	1	1	1	3	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	3	7.1481
5	1	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1	13.9615
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	2	18.7183
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2	2	7.4134
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3	3	15.0993
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	1	20.1153
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	4.5421
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	5.5798
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	6.6958
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2	3	10.4728
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3	1	15.1791
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1	2	13.3847
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1	2	6.4703
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2	3	12.0962
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	1	16.3365
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	4.0141
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	5.0787
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	5.6706
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1	2	6.1299
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	1	10.7862
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3	2	11.1375
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3	3	8.0745
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1	2	15.5947
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2	1	15.1791

**Table 5** 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

행렬실험에 대한 결과는 Table 5에 나타나 있으며 교호작용  $G \times A$ 가 유의하다고 판단되므로 Table 6을 작성하여 그 값을 최적수준 선정에 반영하고 나머지 교호작용들은 상대적으로 크기가 대단히 작기 때문에 무시한다. 인자 A, G 사이에 강한 방향적 교호작용이 있음을 확인 할 수 있다.

Table 6 2-way table to estimate  $G \times A$  (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

4.2.2 5 부재 트러스

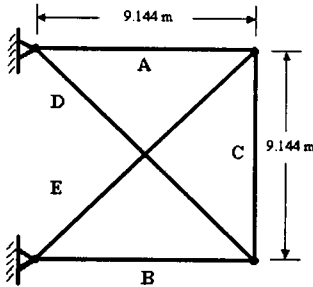


Fig. 4 Five bar truss

Table 7 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

교호작용을 뚜렷이 나타나도록 하기위해 설계 변수 C의 수준을 편기(bias)시키고, 각인자의 수준들의 값은 Table 7과 같다. 자유도는 11이며 Table 8과 같이 표준 직교배열표  $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 를 선택하여 교호작용을 고려하지 않은 행렬실험을 수행한다. 분석결과와 최적수준은 Table 9에 나타나 있으며 최적수준조합  $A_3B_3C_2D_2E_3$ 에 의한 진동수의 예측치와 실측치의 차이  $|\eta_{opt}^{preu} - \eta_{opt}^{exp}|$ 는 3.0375 이고 90% 신뢰도 범위에서  $2\sigma_{pred}$ 는 2.0653 이므로 가산성이 성립하지 않는다.

Table 8 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	C	D	E	e	e	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	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 9 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

1 차 고유진동수에 대해 제곱합이 큰 A 인자와 나머지 인자들과의 4 개의 2 인자 교호작용을 고려해 주었다. 자유도가 27 이므로  $L_{27}(3^{13})$ 을 선택하고 Fig. 5와 같은 선점도에 따라 인자와 교호작용을 교락없이 배치하여 행렬실험을 수행한다. 행렬실험에 대한 결과는 Table 10에 나타나 있으며 진동에 대한 제곱합을 구한 결과 교호작용  $A \times E$ 가 유의하다고 판단되므로 Table 11을 작성하여 그 값을 최적수준 선정에 반영하였다.

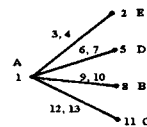


Fig. 5 A standard linear graph for  $L_{27}(3^{13})$

Table 10 Analysis of  $\eta$  (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	$A \times E$				4	125.7035
5	D	33.9714	36.7381	35.9199	2	36.3627
6, 7	$A \times D$				4	3.3838
8	B	33.3263	36.0655	37.2377	2	72.5306
9, 10	$A \times B$				4	1.9863
11	C	37.2954	35.3867	33.9474	2	50.7720
12, 13	$A \times C$				4	0.7570

**Table 11** 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 12** The optimum Level

Factor		A	B	C	D	E	Results $\eta$ (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 5 인자에 대한 전조합 실시법은 3<sup>5</sup>인 243 회의 실험을 수행하게 된다. Table 12 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 이산설계방법을 제시하였으며 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 행렬실험을 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.
- (4) 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 기인된다.

## 후 기

이 연구는 한국과학재단지정 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) Salajegheh, 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.