

# 직교배열표를 활용한 슬래브 구조체의 진동 해석 Vibration Analysis in Reinforced Concrete Slab Using Tables of Orthogonal Arrays

서상호\* · 전진용\*\*  
Sang Ho Seo, Jin Yong Jeon

**Key Words :** Tables of Orthogonal Arrays (직교배열표), Design of Experiment(DOE, 실험계획법), Analysis of Variance(ANOVA, 분산분석), FEA(finite element analysis, 유한요소해석), Natural Frequency(고유진동수), Mode shape(모드형),

## ABSTRACT

Finite element analysis of concrete slab system in apartment building was executed using the tables of orthogonal arrays, and optimal design process was proposed. At first, experimental results show that sound peak components to influence the overall level and the rating of floor impact sound insulation were coincident with natural frequencies of the reinforced concrete slab. Finite element model of concrete slab was compared with experimental results, and well corresponded with an error of less than 10%. The tables of orthogonal arrays were used for finite element analysis with 8 factors. 3 related to material properties and 5 related to slab shape parameters and its results were analyzed by statistical method, ANOVA. The most effective factor among them was slab thickness, and main effect factor from slab shape parameters was different from each natural frequency. The interaction was found in the higher mode over 3<sup>rd</sup> natural frequency. From main effect plot and interaction plot, the optimal design factor to increase the natural frequency was determined.

## 1. 서론

최근 공동주택에서 발생하는 바닥충격음이 사회적으로 크게 이슈화되고 있는 가운데, 이에 대한 규제방안이 마련되어 경량충격음에 대해서는 이미 도입되어 실시 중에 있으며 중량충격음은 조만간 도입될 예정이다.

경량충격음은 가벼운 물건이 떨어지거나 여성들의 하이힐 등에 의해 발생하는 것으로 비교적 낮은 레벨의 중고주파 특성을 가지며 이에 대한 평가를 위해 태핑머신(tapping machine)이 사용되고 있다. 이러한 경량충격음은 비교적 넓은 범위의 주파수 대역을 그 특징으로 하나 바닥마감재 등을 이용한 표면완충공법이나 완충재(resilient materials)를 적용한 뜬바닥 공법 등을 통해 비교적 만족할 만한 수준의 저감 효과를 거두고 있는 것으로 알려져 있다<sup>(1-4)</sup>.

이에 반해, 중량충격음은 주로 수십 내지 수백 Hz 이하의 저주파 성분을 가지는 것이 특징이며 비교적 무거운 충격원에 의해 발생하는 소음으로 청감적으로는 경량충격음보다 소비자 불만이 더 크며 그 발생빈도 또한 높아 사회적 문제가 되고 있는 실정

이다<sup>(5-6)</sup>. 또한 경량충격음과는 달리 저주파 특정 주파수 대역 즉 바닥 구조의 동특성과 밀접하게 관련되어 있어 콘크리트 슬래브의 두께를 증가시키거나 고강성 공법 등을 통해서만 제한적으로 효과가 있어 저감에 많은 한계가 따르고 있으며 이에 따라 실효성 있는 표준바닥구조나 적절한 규제 방안 도입이 미뤄지고 있는 형편이다.

이에 대한 해결책으로 현재까지는 중량충격음 저감을 위한 바닥구조를 도출함에 있어 주로 현장이나 실험동 시공 등 실험적 방법에 의해 진행되어 보다 많은 설계인자에 의한 검증 작업에 한계가 있다. 또한 개선방법에서도 시행착오적으로 이루어져 성능개선 최적값에 도달하기 위한 판단 근거가 마련되지 않아 인자 설계에 큰 걸림돌이 되고 있다. 이러한 한계를 극복하고자 통계적인 방법을 이용한 최적화 기법이 필요하게 되었다. 최근 최적설계 알고리즘이 유한요소법(Finite Element Method)을 이용한 구조 해석에 성공적으로 적용되면서 대형 구조물의 동적 및 정적 해석 등과 같은 여러 가지 다양한 기계, 자동차 및 항공분야에 폭넓게 활용되고 있다<sup>(7)</sup>. 유한요소해석(FEA, Finite Element Analysis)을 통해 건축 구조물 특히 중량 바닥충격음과 관련된 콘크리트 슬래브에 대한 진동 해석이 국내에서 시도되고 있으나<sup>(8)</sup>, 이들 구조물 내 설계 인자에 대한 최적화 관점에 대한 연구는 다소 미흡한 상황이다.

또한 보다 계획적이면서 효율적인 실험을 위해 실험계획법(DOE, design of experiment)이 자주 활용

· 한양대학교 건축공학과 박사과정  
E-mail : paulseo@ihanyang.ac.kr  
Tel : (02) 2220-1795, Fax : (02) 2291-1793  
.. 한양대학교 건축공학부 부교수

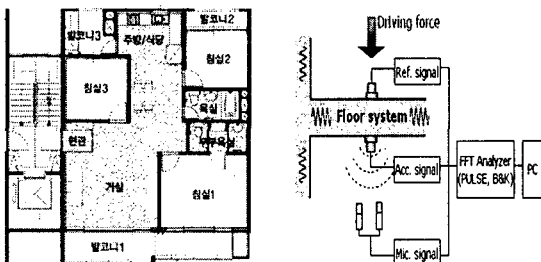
되고 있는데 이는 최소의 실험횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는 것이라고 정의할 수 있으며 실험계획법의 일종인 직교배열표(Tables of orthogonal arrays)나 다구찌법(Taguchi method) 등이 활발히 전개되고 있다<sup>(9-11)</sup>.

본 연구에서는 바닥 구조의 동특성을 분석함에 있어 최적 설계 관점에서 주요 설계인자를 선정하고 이들의 설계치에 따른 고유진동수 변화를 고찰하는 민감도 해석을 실시하고자 한다. 이를 위해 먼저 실험을 통해 바닥충격음과 바닥충격진동간 상관성에 대해 주파수분석을 실시하고, 유한요소법을 이용하여 적합한 유한요소모형을 구축한 후, 실험계획법중 하나인 직교배열표를 접목하여 바닥구조의 형상 최적화를 위한 설계방안을 제시하고자 한다.

## 2. 바닥 구조의 소음 및 진동 특성

### 2.1 연구 대상

본 연구에서는 최근 아파트 공급 평형 중 약 48.3%를 차지하는 30 평형대를 선정하였으며, 거주자들이 가장 많은 시간동안 거주하며 가족이 공동으로 사용하고 있고 또한 충격음 발생 빈도가 높으며 세대 내 면적이 가장 넓은 주방/거실 공간을 실험 및 해석 대상으로 하였다. 이에 대한 평면도와 실험 개략도는 Fig. 1 과 같다.



(a) plain figure (b) experimental layout  
Fig. 1 Apartment plain figure and experimental layout

### 2.2 실험 과정

바닥 충격진동 및 충격소음의 특성 파악 및 주파수 분석을 위해 실제 구조 슬래브에 기포 콘크리트와 마감 몰탈을 타설하기 전인 나 슬래브 구조를 그 대상으로 진행하였으며, 거실의 중앙 1개 지점에 5회 가진하였으며, 진동은 수음실 천장 중앙 1개 지점에서, 소음은 수음실 중앙지점에서 측정하여 평균하였다.

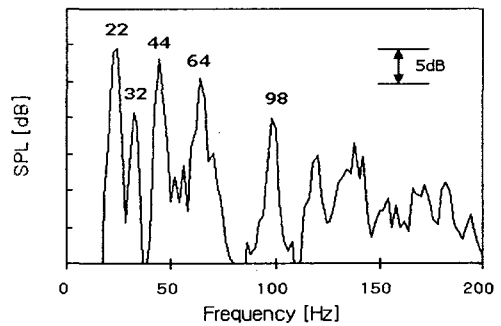
이때 중량충격원에 의해 가진시 정상상태 응답과는 달리 임펄스와 유사한 매우 짧은 시간 내 전달된 진동 및 소음 특성이 나타나므로, 측정에 보다 세심한 주의를 필요로 하게 된다. 따라서 본 연구에서는 가진점에서 50cm 떨어진 위치에 가속도

센서를 설치하여 이를 기준신호로 활용하였는데 즉, 이 가속도 센서를 통해 일정 이상의 레벨이 입력될 때 계측이 시작될 수 있도록 동기화하였다.

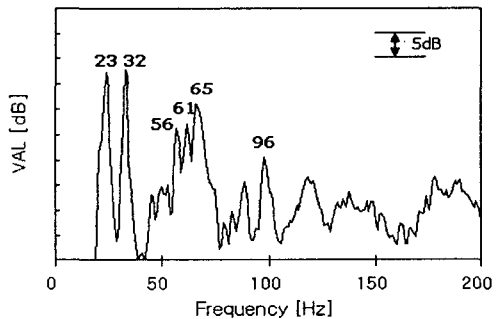
### 2.3 실험 결과

Fig. 2는 수음실에서 측정된 음압레벨(SPL, Sound Pressure Level)과 진동가속도레벨(VAL, Vibration Acceleration Level)을 나타낸다.

Fig. 2(a)에서와 같이 중량충격음의 지배 주파수는 100Hz 이하의 저주파 성분으로 구성되어 있으며 이 대역 내 주요 피크치는 22, 32, 44, 64Hz 등이다. 이러한 피크성분들이 전체 총합소음레벨(overall sound level)과, 바닥충격음 차단성능 평가에 가장 크게 기여하고 있다.



(a) sound pressure level



(b) vibration acceleration level

Fig. 2 Floor impact sound and vibration spectrum by heavy impact source

Fig. 2(b)에서와 같이 진동 스펙트럼 특성 또한 100Hz 이하 저주파에서 지배적인 특성을 보이고 있다. 특히 1~2차 피크에서 높은 에너지레벨을 보이고 있으나 약 40~50Hz 이상의 대역에서는 다소 복잡한 모드로 보이는 다양한 피크들이 분포되어 있음을 알 수 있다.

이러한 소음 및 진동 특성은 그 피크 주파수 성분에 있어서 거의 일치하고 있는데, 이는 저주파 대역에서의 중량충격음의 높은 피크 성분들은 바닥 슬래브의 구조적 동특성 즉, 고유 진동수(natural

frequency)의 영향으로 특정 주파수에서 높은 에너지 특성을 가진 구조진동의 영향으로 판단된다. 특히 50~60Hz 대역의 높은 소음 성분들은 바닥 차단 성능을 결정짓고, 바닥 슬래브 구조의 저 차 고유진동수에 해당하는 주파수이므로 가능한 회피해야 할 성분으로 판단된다.

따라서 바닥 충격음에 대한 체계적인 분석 및 저감을 위해서는 바닥 슬래브 구조의 동특성에 대한 체계적인 연구가 필요하며, 특히 각 설계인자가 미치는 영향을 체계적으로 분석할 수 있는 민감도 해석 등이 선행되어 효율적인 동특성 개선 방향과 최적 설계 방안이 마련될 수 있을 것으로 사료된다.

### 3. 유한요소해석

#### 3.1 2차원 모델링

단순화된 슬래브 구조의 주방/거실에 대해 타당성 있는 유한요소모델을 구축하기 위해 구조 및 진동 해석용 프로그램인 ANSYS를 이용하여 모드해석 및 과도해석을 실시하였으며 이를 실험과 비교하였다.

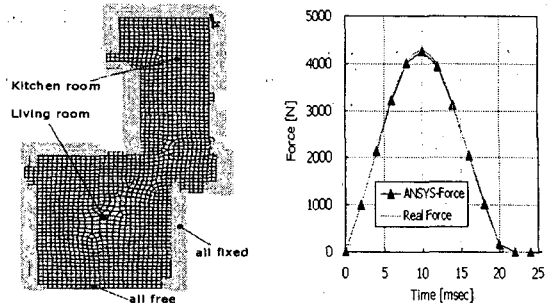
Fig. 3은 30평형대 대상 아파트의 주방/거실에 대한 유한요소모델과 과도해석을 위해 사용된 표준중량충격원의 가진력을 나타낸다. 또한 Table 1은 본 해석에 사용된 나 슬래브 바닥 구조의 주요 물성치를 나타낸다.

유한요소모델의 신속한 모델링 및 해석을 위해 6개 자유도의 6절점을 가지는 2차원 쉘 요소(shell element)를 사용하였으며 총 2066개의 요소를 가진다. 주요 경계 조건은 크게 2가지로, 벽체와 연결된 부분에서는 병진방향 모드와 회전방향 모드 6개를 모두 고정시키는 고정(fixed) 조건으로, 문 또는 통로로 연결된 부분에서는 6개 모드의 모든 자유도를 풀어주는 (free) 조건으로 설정하였다.

#### 3.2 진동 해석 결과

Table 2는 나 슬래브 바닥 구조의 주방/거실에 대해 현장에서 측정된 소음과 진동 피크 주파수 성분과 본 연구에서 구축된 유한요소모델을 통해 해석된 고유진동수를 비교한 것으로, 1~5차 고유 진동수에 대해 진동 실험 결과와 최고 약 10% 오차 범위 내에서 비교적 잘 일치하였다. 특히 2차 고유 진동수에서 실험과 큰 차이를 보이는 것은 이 모드와 관련된 베란다 창 과 보 요소에 대한 경계 조건의 영향에 의한 것으로 향후 보다 정확한 경계 조건에 대한 고려가 필요한 것으로 사료된다.

Fig. 4는 유한요소법을 이용하여 거실/주방에 대해 과도해석을 실시한 결과를 나타내는 것으로, 거실부 중앙 지점에서의 가속도 응답을 나타낸다.



(a)FE modeling (b)driving force  
Fig. 3 Finite element model and driving force of standard heavy-weight source

Table 1 Material properties for FEA

No.	Type	Value
1	Thickness	[mm] 150
2	Elastic modulus	[N/m <sup>2</sup> ] 2.254 × 10 <sup>10</sup>
3	Density	[kg/m <sup>3</sup> ] 2400
4	Poisson ratio	- 0.167
5	Damping ratio	- 0.054

Table 2 Comparison of experiment with FEA

Modes	Experiment		FEA	
	Noise	Vibration	Vibration	Error [%]
1	22	23	23.3	1.3
2	32	31	34.2	9.4
-	44	-	-	-
3	56	56	57.5	2.6
4	-	61	61.0	0.0
5	64	65	61.9	5.0

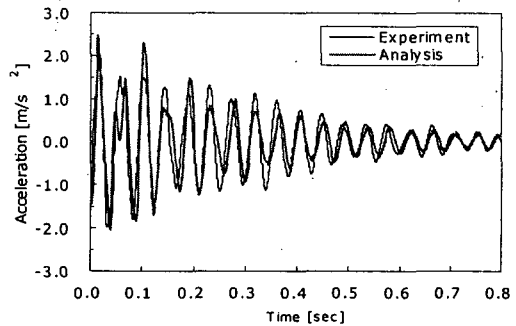


Fig. 4 Transient time response in the central point of living room by FEA

과도해석 결과, Fig. 4에서와 같이 가속도 응답 특성과 피크치는 실험과 잘 일치함을 알 수 있다. 특히 가속도 피크치 2.45m/s<sup>2</sup>은 실험치 2.42m/s<sup>2</sup>에 비해 약 2% 이내의 오차를 가짐으로 본 해석에서 구축된 유한요소모델이 타당함을 알 수 있다.

#### 4. 실험계획법

##### 4.1 직교배열표(Tables of orthogonal arrays)

실험계획법(DOE, Design Of Experiment)은 1920년대 영국인 R. A. Fisher(1890~1962)에 의해 도입되어 초기 농업시험 등에 한정되어 이용되었지만 그 후 2차 대전 이후에는 공장 실험에 적용되어 수율과 품질 향상에 좋은 효과를 올렸으며 최근에는 공학 실험 외에도 시장 조사 연구, CAE 등의 전산응용을 포함하여 다양한 분야에서 최적 설계 및 통합 설계에 광범위하게 활용되고 있다.

직교배열표는 실험계획법 중 하나인 일부 실시법의 대표적 사용 예라 할 수 있으며, 설계 인자가 많을 경우 “그물코가 큰 그물”을 이용하여 주효과(main effect)와 기술적으로 의미 있는 2인자 교호작용(interaction)만 도출하고, 기술적으로 유의하지 않은 2인자 및 고차의 교호작용을 포기하여 일부 실시법을 수립하는 방법이다. 여기서 인자(또는 요인, factor)는 실험 또는 해석 등 그 결과에 직접적으로 영향을 주는 원인을 의미한다.

2수준(level)의 직교배열표는 일반적으로 다음과 같이 나타낸다.

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

여기서,  $m$ 은 2 이상의 정수이고,  $2^m$ 은 실험(또는 해석)의 크기이며, 2는 2수준을 나타내며,  $(2^m-1)$ 은 열의 수를 의미한다. L 자는 직교배열표를 처음에 Latin Square(라틴 방계법)에 사용되면서 따온 글자이다.

$2^m$  형의 실험을 주로 2수준 직교배열표에 사용하고, 배치 가능한 인자의 최대수는 열의 수  $(2^m-1)$ 이므로 최대로  $(2^m-1)$ 개의 인자를  $2^m$  회의 실험횟수로 실험이 가능하다.

본 연구에서는 이러한 직교배열표를 유한요소해석에 적용하고 그 결과에 대해 통계 분석함으로써 최적설계 방안을 제시하고자 한다.

##### 4.2 인자의 선정

본 직교배열표에 고려된 인자는 총 8개이며, 바닥구조의 물성과 관련된 인자인 슬라브 두께(A), 압축강도(B) 및 밀도(C) 3가지와 Fig. 5와 같이 바닥 구조의 형상과 관련된 인자(D, E, F, G, H) 5가지 등이며, 각 인자에 대한 조건으로 2수준을 고려하였다.

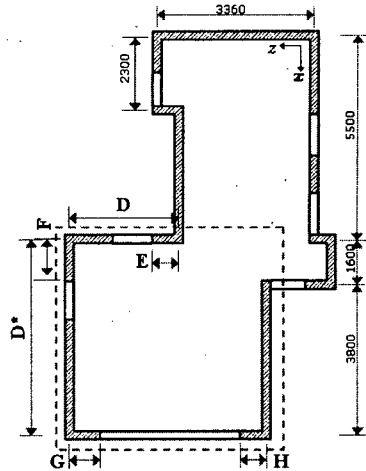


Fig. 5 Factors in the living/kitchen room

특히 설계 인자 D는 거실의 폭과 직접적으로 관련되는 것이나 이 치수가 변경되면 거실 면적이 바뀌어 일반적인 아파트 평면 구조상 평형 자체가 바뀌게 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 D 값이 변경되더라도 전체 거실 면적은 일정하게 유지 되도록  $D^*$ 를 조정하였다.

Table 3과 4는 본 고려된 8개 인자별 수준과  $L_{64}(2^8)$ 의 직교배열표를 나타내는 것으로, 총 64회의 유한요소해석을 실시하였다.

##### 4.3 분산분석(ANOVA, analysis of variance)

분산분석은 특성치(또는 결과치)의 산포에 대해 제곱 합(sum of squares)으로 나타내고 이 제곱 합을 실험과 관련된 인자마다의 제곱 합으로 분해하여 오차에 비해 특히 큰 영향을 주는 인자가 무엇인가를 찾아내는 분석 방법이다. 각 인자의 제곱 합을 그 인자의 자유도로 나누면 그 인자의 제곱 평균이 되며 오차분산에 비하여 얼마나 큰가를 검토하게 되는 것이다. 즉, 특성치의 산포를 인자 별로 분해하여 어느 인자가 큰 산포를 나타내고 있는가를 규명하는 방법이다.

회귀분석(regression analysis)은 이러한 변수들간의 관련성을 규명하기 위해 어떤 수학적 모형을 가정하고, 이 모형을 측정된 변수들의 데이터로부터 추정하는 통계적인 분석방법을 말한다. 회귀분석의 주된 목적은 독립변수의 값을 지정했을 때의 종속변수가 갖는 값의 정확한 추정에 있으나, 상관분석에서는 양 변수의 산포의 상호 관련성을 상관계수로부터 알아내고자 하는데 있으므로 다소 차이가 있다.

이러한 회귀분석에는 단순회귀분석(simple regression analysis), 중회귀분석(multiple regression analysis) 및 곡선회귀분석(curvilinear regression analysis)이 있으며 본 연구에서는 2이상의 독립변수에 하나의 종속변수로 1차 함수를 가정하는 중회귀분석을 사용하였다. 특히

회귀분석의 타당성은 총변동 중에서 회귀선에 의하여 설명되는 변동이 차지하는 비율인 결정계수(coefficient of determination)와 분산 분석표에 의한 F-검정으로 이루어진다.

Table 3 Factors and levels

Factors		Level	
		1	2
Thickness [mm]	A	150	180
Compression strength [kg/cm <sup>2</sup> ]	B	210	252
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	C	2400	2880
Door position 1 [mm]	D	3230	3530
Length 1 [mm]	E	10	1000
Door position 2 [mm]	F	10	1000
Length 2 [mm]	G	300	500
Length 3 [mm]	H	300	500

Table 4 Table of orthogonal arrays L<sub>64</sub>(2<sup>8</sup>)

Runs No.	Factor								Data
	A	B	C	D	E	F	G	H	
1	0	0	0	0	0	0	1	1	y1
2	1	0	0	0	0	0	0	0	y2
3	0	1	0	0	0	0	0	0	y3
4	1	1	0	0	0	0	1	1	y4
5	0	0	1	0	0	0	0	1	y5
6	1	0	1	0	0	0	1	0	y6
7	0	1	1	0	0	0	1	0	y7
8	1	1	1	0	0	0	0	1	y8
9	0	0	0	1	0	0	0	1	y9
10	1	0	0	1	0	0	1	0	y10
11	0	1	0	1	0	0	1	0	y11
12	1	1	0	1	0	0	0	1	y12
13	0	0	1	1	0	0	1	1	y13
14	1	0	1	1	0	0	0	0	y14
15	0	1	1	1	0	0	0	0	y15
16	1	1	1	1	0	0	1	1	y16
17	0	0	0	0	1	0	1	0	y17
18	1	0	0	0	1	0	0	1	y18
19	0	1	0	0	1	0	0	1	y19
20	1	1	0	0	1	0	1	0	y20
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
64	1	1	1	1	1	1	1	1	y64

## 5. 결과 및 분석

### 5.1 분산 분석

Table 5 는 실험 계획법에 의한 직교배열표를 이용하여 유한 요소 해석을 수행한 결과로서 간단히 1 차 ~ 2 차 고유진동수만 나타냈다. 반면, Table 6~7 은 바닥 구조의 물성치와 거실부 형상을 결정짓는 인자들의 주효과와 교호작용을 보여주는 회귀모형의 계수와 t-검증을 보여준다.

먼저 바닥 구조의 1 차 고유진동수의 경우, 예측된 회귀모형의 계수의 경우, 유의 수준 5%에서 1 차 인자 E 를 제외한 A~H 가 모두 유의한 결과

즉 각 인자는 고유진동수에 영향을 미치고 있음을 보여주며 추정된 모형이 적합하다는 것을 의미한다. 그러나, 2 차 교호작용에는 유의하지 않은 것으로 나타났다. 즉, 2 차 고유진동수의 경우, 1 차 인자의 경우 모두 유의한 결과를 보이고, 2 차 교호작용은 유의 수준 10%에서 D\*E, D\*G, D\*H 및 G\*H 가 유의함을 보여주고 있다.

### 5.2 요인분석과 최적 수준

Fig. 6 은 파레토 그림을 나타내는 것으로 이의 수치는 정규화된 t 값이 아닌 실제 값으로 표현된 것인데, 일부 실시법에서 모든 인자가 포함된 회귀식은 t 값으로 정규화 할 수 없기 때문이다.

주요 설계인자 중 슬라브 두께(A)와 거실 폭(D)이 1 차 고유진동수에 가장 큰 영향을 미치는 것임을 알 수 있으며, 이어서 콘크리트 압축강도(B)와 밀도(C) 순으로 밀도 또한 구조의 형상에 비해 다소 그 효과가 큰데 이는 밀도가 콘크리트 압축강도에 직접적인 영향을 미치기 때문이다. 2 차 고유진동수의 경우, 가장 큰 영향을 미치는 것으로 A>C=B>H>G>D 등의 순으로 바닥 구조의 형상의 영향이 증가하였음을 보여준다.

Fig. 7 은 바닥 구조의 형상 관련 인자에 따른 주효과를 고유진동수 1~4 차에 대해 나타냈다. 1 차 고유진동수의 주요 인자는 D, G, H 로 거실 폭(D)에 가장 큰 영향을 받으며, 2 차 고유진동수의 주요 인자는 G, H, D 로 거실폭보다는 베란다 부분의 경계조건(G, H)에 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 특히 베란다 부분의 경계조건은 이 값이 커질수록 벽체가 늘어남을 의미하는 것으로 1~4 차 모두를 증가시키게 된다. 이에 따라 3 차 고유진동수의 주요 인자는 D 이며, 4 차 고유진동수는 G 가 주요 인자임을 알 수 있다.

Fig 8 은 고유진동수에 따른 교호작용을 나타낸다. 1~2 차 등 저차 모드에서는 형상관련 설계인자간 교호작용은 거의 나타나지 않는 반면, 3 차 이상의 고차 모드를 갈수록 각 인자 사이에 교호작용이 크게 증가함을 알 수 있다. 이는 모든 차수의 고유진동수를 일괄적으로 증가함에는 한계가 있는 것을 의미한다. 따라서 주효과와 교호작용의 분석 결과로부터, 바닥 구조의 고유진동수를 증가시키는 최적 형상은 1~3 차 고유진동수에 대해 D<sub>0</sub>E<sub>1</sub>F<sub>0</sub>G<sub>1</sub>H<sub>1</sub>임을 알 수 있다.

Table 5 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> natural frequencies by FEA

No.	f <sub>n1</sub>	f <sub>n2</sub>	No.	f <sub>n1</sub>	f <sub>n2</sub>	No.	f <sub>n1</sub>	f <sub>n2</sub>
1	24.4	36.0	23	26.8	39.8	45	22.5	35.8
2	27.8	40.8	24	30.5	45.1	46	26.9	42.6
3	24.4	35.8	25	21.0	33.9	47	23.6	37.4
4	30.5	44.9	26	26.5	42.2	48	28.2	44.6
5	25.0	36.7	27	23.2	37.1	49	24.4	36.0
6	29.9	43.7	28	26.3	42.3	50	27.8	40.7
7	26.2	38.4	29	22.6	36.2	51	24.3	35.7
8	31.2	45.8	30	27.0	43.1	52	30.4	44.8
9	21.6	34.4	31	23.7	37.9	53	24.9	36.6
10	25.8	41.0	32	28.3	45.1	54	29.8	43.6
11	22.6	36.0	33	23.8	34.8	55	26.1	38.3

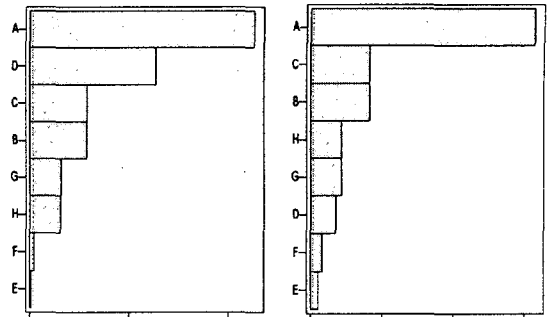
12	27.0	42.9	34	28.4	41.4	56	31.2	45.6
13	23.2	36.9	35	24.9	36.4	57	21.5	34.3
14	26.3	42.1	36	29.7	43.3	58	25.7	40.8
15	23.0	37.0	37	24.3	35.5	59	22.6	35.9
16	29.0	46.0	38	30.4	44.5	60	26.9	42.7
17	23.9	35.3	39	26.6	39.1	61	23.1	36.7
18	28.6	42.1	40	30.4	44.3	62	26.2	41.9
19	25.0	37.0	41	20.9	33.5	63	23.0	36.8
20	29.9	44.1	42	26.4	41.7	64	28.9	45.8
21	24.4	36.1	43	23.1	36.6			
22	30.6	45.3	44	26.2	41.7			

Table 6 ANOVA for 1<sup>st</sup> natural frequency

source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	1	342.25	342.25	342.25	1.10E+4	0.00
B	1	22.56	22.56	22.56	698.11	0.00
C	1	22.80	22.80	22.80	705.48	0.00
D	1	109.20	109.20	109.20	3378.85	0.00
E	1	0.01	0.01	0.01	0.31	0.58
F	1	0.14	0.14	0.14	4.35	0.04
G	1	6.76	6.76	6.76	209.16	0.00
H	1	6.50	6.50	6.50	201.19	0.00
D*E	1	0.01	0.01	0.01	0.17	0.68
D*F	1	0.00	0.00	0.00	0.08	0.78
D*G	1	0.00	0.00	0.00	0.02	0.89
D*H	1	0.00	0.00	0.00	0.02	0.89
E*F	1	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
E*G	1	0.00	0.00	0.00	0.02	0.89
E*H	1	0.00	0.00	0.00	0.02	0.89
F*G	1	0.00	0.00	0.00	0.08	0.78
F*H	1	0.00	0.00	0.00	0.08	0.78
G*H	1	0.01	0.01	0.01	0.17	0.68
Error	45	1.45	1.45	0.03		
Total	63	511.70				

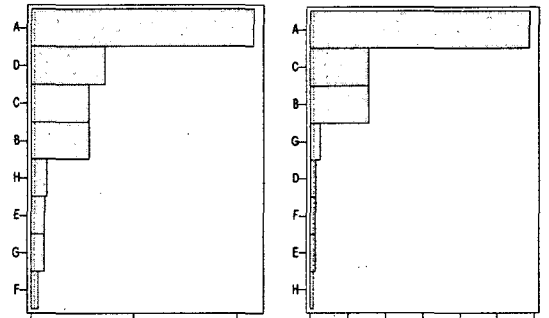
Table 7 ANOVA for 2<sup>nd</sup> natural frequency

source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	1	775.623	775.623	775.623	2.70E+4	0.00
B	1	52.926	52.926	52.926	1839.11	0.00
C	1	53.29	53.29	53.29	1851.78	0.00
D	1	9.456	9.456	9.456	328.57	0.00
E	1	0.856	0.856	0.856	29.73	0.00
F	1	2.102	2.102	2.102	73.06	0.00
G	1	14.251	14.251	14.251	495.2	0.00
H	1	14.251	14.251	14.251	495.2	0.00
D*E	1	0.076	0.076	0.076	2.63	0.11
D*F	1	0.01	0.01	0.01	0.35	0.56
D*G	1	0.076	0.076	0.076	2.63	0.11
D*H	1	0.141	0.141	0.141	4.89	0.03
E*F	1	0.023	0.023	0.023	0.78	0.38
E*G	1	0.001	0.001	0.001	0.02	0.88
E*H	1	0.001	0.001	0.001	0.02	0.88
F*G	1	0	0	0	0	1.00
F*H	1	0	0	0	0	1.00
G*H	1	0.106	0.106	0.106	3.67	0.06
Error	45	1.295	1.295	0.029		
Total	63	924.479				



(a) 1<sup>st</sup> natural frequency

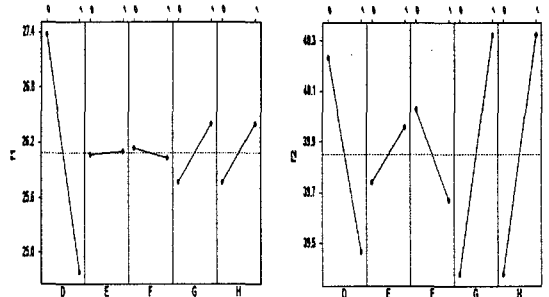
(b) 2<sup>nd</sup> natural frequency



(c) 3<sup>rd</sup> natural frequency

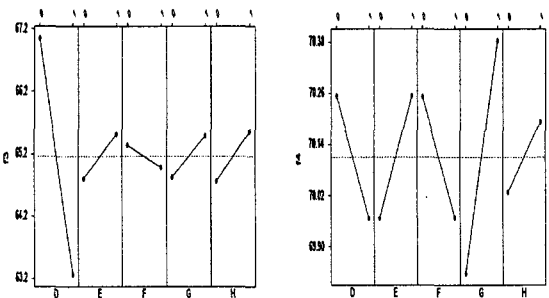
(d) 4<sup>th</sup> natural frequency

Fig. 6 Pareto chart of the standardized effects for natural frequencies ( $\alpha = 0.1$ )



(a) 1<sup>st</sup> natural frequency

(b) 2<sup>nd</sup> natural frequency



(c) 3<sup>rd</sup> natural frequency

(d) 4<sup>th</sup> natural frequency

Fig. 7 Main effect plot for natural frequencies

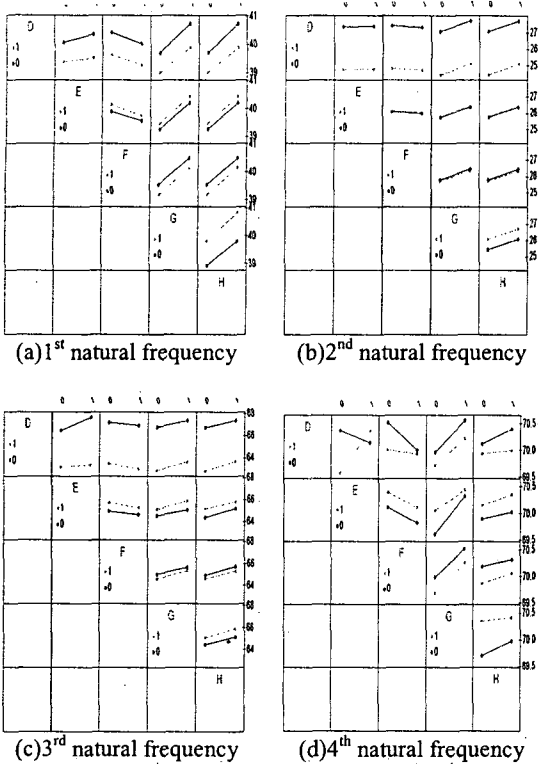


Fig. 8 Interaction effect plot for natural frequencies

## 6. 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 직교배열표를 이용하여 공동주택 바닥 구조의 주요 설계 인자를 선정하고, 각 설계 인자가 바닥 구조의 진동 특성인 고유 진동수에 미치는 영향을 유한 요소법을 이용하여 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 바닥 충격음의 주요 피크 성분들은 바닥 구조의 진동 특성에 의해 발생된 것이며, 제안된 2 차원 형상의 유한요소모델은 실험치와 10% 이하의 오차 범위에서 비교적 잘 일치하였다.

2) 바닥 구조의 진동 특성인 고유 진동수에 영향을 미치는 주요 설계 인자에 대한 통계적 해석을 실시하였으며 또한 각 인자의 민감도 분석을 통해 동특성 개선을 위한 설계안 제시가 가능하였다.

3) 고유진동수에 가장 영향을 미치는 주요 인자는 슬라브 두께(A)와 거실부의 폭(D)이며, 3 차 고유진동수 이상의 고차 모드에서는 각 인자간 교호작용이 증가함을 알 수 있었으며, 특히 거실폭과 길이의 교호작용(D\*E)이 큼을 확인하였다.

향후 과제로는, 주요 설계 인자에 대한

진동레벨에 대한 민감도 해석 및 실험을 통해 실질적인 저감 방안을 도출하고자 한다.

## 후기

본 연구는 환경부 “차세대 핵심 환경 기술 개발 사업” (과제번호 : 2004-11002-0003-0)의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고 문헌

- (1) William W. Fearon, 1986, “ Floating floors for impact and airborne noise control”, SV. Sound and Vibration 20(10) pp.20~22.
- (2) 전진용 등, 2002, “ 구조부위별 차음시공에 따른 공동주택의 바닥충격음 차단성능평가”, 대한건축학회논문집 계획계, Vol.18, No.6, pp.127~134
- (3) 김선우 등, 2002, “ 천정구조와 바닥 마감재의 조합에 따른 경량충격음 응답특성 및 저감량에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회논문집 계획계, Vol.18, No.8, pp.177~184.
- (4) 기노갑 등, 2003, “ 바닥마감재에 의한 바닥충격음 차음특성 연구”, 대한건축학회 학술발표논문집, pp. 645~648.
- (5) Jeon J. Y. and Jeong, J. H., 2003, “ Measurements of floor impact noise using a new impact ball”, Noise-con, USA
- (6) J.Y. Jeon, 2001, “ Subjective evaluation of floor impact noise based on the model of ACF/IACF”, Journal of Sound and Vibration, 241, 147-155
- (7) Erwin H. Johnson, 1998, “ Considerations in the performance of large structural optimization tasks”, Proceedings of the 7<sup>th</sup> AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary analysis and Optimization - Part 1, pp.165-169
- (8) S. H. Seo and J. Y. Jeon, 2004, “ Vibration analysis in reinforced concrete slab using the finite element method”, Preceedings of ICSV11 2004, pp.
- (9) 박성근, 김진동, 1997, “ 회전형 압축기용 저소음 머플러 개발을 위한 다구찌 기법의 적용”, 대한기계학회 춘계학술대회논문집 B., pp.91~95
- (10) 이병찬, 김진동, 2004, “ 다구찌 법을 이용한 에어컨용 회전압축기 공명기에 관한 실험적 연구”, Vol.14, No.1, pp.3~9
- (11) 오재용, 조용구 등, 2001, “ 다구찌법을 이용한 자동차 흡기계의 저소음화에 대한 연구”, Vol.11, No.2, pp.234~240