

공동주택의 바닥충격진동 저감을 위한 유한요소법 및 다구찌법의 활용

Application of Finite Element Method and Taguchi Method to Reduce Floor Impact Vibration in Apartment Buildings

서 상 호* · 전 진 용*

Seo Sang-Ho and Jeon Jin-Yong

Key Words : Floor Impact Vibration(바닥충격진동), Finite Element Method(유한요소법), Taguchi Method(다구찌법), Table of Orthogonal Arrays(직교배열표), SN Ratio(신호대 잡음비), Interaction(교호작용), Optimal Design Value(최적설계치)

ABSTRACT

Finite element method and Taguchi method were used to reduce the floor impact vibration of the reinforced concrete slab in the apartment buildings. At first, experimental results show that sound peak components to influence the rating of floor impact sound insulation were coincident with natural frequencies of the reinforced concrete slab, and there is a high linear relation between floor impact vibration and sound. The tables of orthogonal arrays were used for finite element analysis with 5 factors related to slab shape parameters and its results were analyzed by statistical method. The most effective factor to reduce the floor impact vibration was the length of living/kitchen room and the floor impact vibration was predicted by 30% reduction in the acceleration peak by the optimal design values of the factors.

1. 서 론

최근 국내 생활수준이 높아지고 소음 및 진동 환경에 대한 소비자 인식이 증대되면서 공동주택의 바닥충격음에 대해 사회적으로 크게 이슈화되고 있다. 바닥충격음의 대부분은 중량충격음 즉, 비교적 무거운 가진원에 의해 발생되는 저주파 성분의 소음으로 그 저감 대책이 쉽지 않아 다양한 방안들에 대한 연구가 시도되고 있다.

중량충격음에 대한 해결책으로 현재까지는 바닥구조를 도출함에 있어 주로 현장이나 시험동 시공 등 실험적 방법에 의해 진행되어 보다 많은 설계인자에 대한 검증 작업에 한계가 있다. 또한 개선방법에서도 시행착오적으로 이루어져 성능개선의 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 구조해석에 성공적으로 적용되면서 대형 구조물의 동적 및 정적 해석 등과 같은

여러 가지 다양한 기계, 자동차 및 항공분야에 폭넓게 활용되고 있다. 유한요소해석을 통해 건축 구조물 특히 중량 바닥충격음과 관련된 콘크리트 슬라브에 대한 진동 해석이 국내에서 시도되고 있으나, 이들 구조물 내 설계 인자에 대한 최적화 관점에 대한 연구는 다소 미흡한 상황이다.

계획적이고 효율적인 실험을 위해 실험계획법(DOE, design of experiment)이 자주 활용되고 있는데 이는 최소의 실험횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는 것이라고 정의할 수 있으며 실험계획법의 일종인 다구찌법(Taguchi method) 등이 활발히 전개되고 있다.

본 연구에서는 바닥 구조의 진동 저감을 위해 최적 설계 관점에서 주요 설계인자를 선정하고 이들의 설계에 따른 진동 응답의 변화를 고찰하는 민감도 해석을 실시하고자 한다. 이를 위해 유한요소법을 이용하여 적합한 유한요소 모델을 구축한 후, 다구찌법을 이용하여 바닥구조의 형상 최적화를 위한 설계방안을 제시하고자 한다.

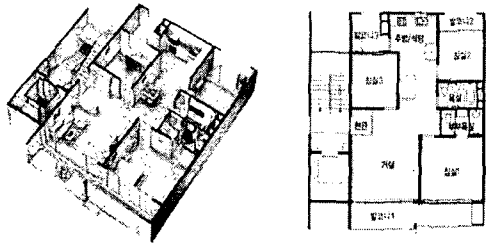
2. 바닥충격진동 및 소음 특성

본 연구의 대상으로 최근 아파트 공급 평형 중 절반 정도를 차지하는 30평형대를 선정하였다. 또한 거주자들이 가장 많은 시간동안 거주하며 가족이 공동으로 사용하고 있고 또한 충격음 발생 빈도가 높으며 세대 내 면적이 가장

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

* 한양대학교 건축대학 건축공학부 부교수

넓은 주방/거실 공간을 실험 및 해석 대상으로 한정하였다. 이에 대한 평면도와 실험 개략도는 Figure.1과 같다.



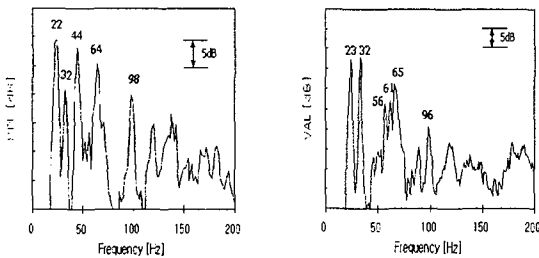
(a) Perspective drawing (b) Plane figure
Fig. 1 Popular and representative apartment building

공동주택의 바닥충격소음 및 진동 특성을 파악하기 위해 그림 1의 거실 중앙 1개 지점에서 표준중량충격원을 이용하여 5회 가진 하였으며 아래층이 거실 중앙 지점에서 소음을 측정하여 평균하였다.

Figure.2와 3은 수음실에서 측정된 음압레벨(SPL, sound pressure Level)과 진동가속도레벨(VAL, Vibration Acceleration Level)을 나타내는 것으로 다음 식(1)과 같이 계산되어 진다.

$$SPL = 20 \log \left(\frac{P_{ms}}{P_{ref}} \right), \quad VAL = 20 \log \left(\frac{A_{ms}}{A_{ref}} \right) \quad (1)$$

여기서, P_{ms} : 음압실효치
 P_{ref} : 기준치로서 $0.00002 [Pa]$ 임.
 A_{ms} : 가속도실효치
 A_{ref} : 기준치로서 $0.00001 [m/s^2]$ 임.



(a) sound pressure level (b) vibration acceleration level
Fig. 2. Floor impact sound and vibration spectrum

실험 결과에서와 같이 중량충격음의 지배 주파수는 100Hz 이하의 저주파 성분으로 주요 피크치는 22, 32, 44, 64Hz 등이다. 이러한 소음 피크들이 총합소음레벨과 바닥충격음 차단성능 평가에 가장 크게 기여하고 있다. 바닥충격진동 스펙트럼 특성 또한 100Hz 이하 저주파에서 지배적

인 특성을 보이고 있음을 알 수 있다.

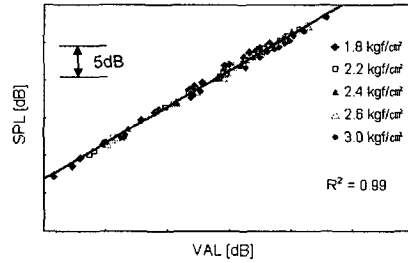


Fig. 3 Correlation between floor VAL and SPL

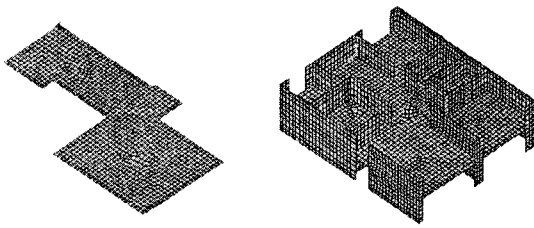
이와 같은 바닥충격음 및 진동 특성은 그 피크 주파수 성분에 있어서 잘 일치하고 있는데, 이는 저주파 대역에서의 중량충격음의 높은 피크 성분들은 슬래브의 동특성 즉, 고유 진동수의 영향으로 특정 주파수에서 높은 에너지 특성을 가진 구조진동의 영향으로 판단된다. 특히 50~60Hz 대역의 높은 소음 성분들은 바닥 차단 성능을 결정짓고, 바닥 슬래브 구조의 저 차 고유진동수에 해당하는 주파수이므로 가능한 회피해야 할 성분으로 판단된다. 또한 충격진동 및 음압레벨의 관계에 있어서도 결정계수(R^2)가 거의 1에 가까워 매우 높은 상관관계에 있음을 알 수 있으며, 진동레벨의 저감량 만큼 음압레벨이 저감될 수 있음을 나타낸다.

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. 유한요소법과 다구찌법의 활용

3.1 유한요소모델

Figure.4는 공동주택 바닥구조의 진동 해석을 위해 고려된 유한요소모델이다. (a)는 2차원 형상의 주방/거실만을 고려한 가장 간단한 유한요소모델로서, 원할한 모델링과 해석을 위한 것으로 벽체와의 연결 구조는 경계조건으로 처리한 것이다. (b)는 한세대의 평면에 벽체를 포함한 3차원 형상의 모델이다. 벽체는 상/하층 중심부까지 고려하였으며 벽체의 끝에 대한 경계조건으로 변위와 모멘트를 0으로 구속한 모델이다. 기존의 연구결과에 의하면, 비교적 단순화된 (a)모델에 대해 적절한 경계조건을 고려할 경우 그 해석 결과에 있어서 전체 구조를 모델링한 (b)모델과 큰 차이가 없었으므로 본 연구에서는 (a)모델을 선정하여 해석을 수행하였다.



(a) kitchen/living room only (b) full 3-dimensional model
Fig. 4 Finite element model of reinforced concrete slab

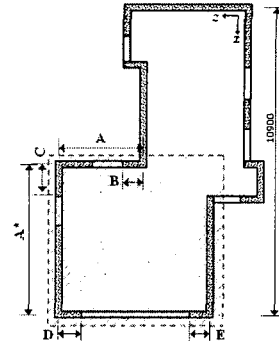


Fig. 5 Factors of the reinforced concrete slab

3.2 다구찌법

다구찌 실험계획법은 일본의 다구찌 겐이찌가 구현한 제품의 품질개선 기법으로 제어 가능한 인자로 제어 할 수 없는 잡음인자에 강건한 설계(robust design)라고 알려져 있다. 이러한 품질에 대한 합리적인 평가를 위해 목표치(y)에서 벗어난 정도를 손실적 측면으로 다룬 것으로 손실함수를 정의하였으며, 목표치의 종류에 따라 망소특성, 망대특성 및 망목특성으로 구분되며, 본 연구에서는 진동가속도를 목표치로 하여 이를 감소시키는 방향의 망소특성을 이용하였다.

다구찌 실험에 있어서 특성치가 결과수치라면 입력과 관련된 변수를 인자라 하며, 이에는 상수인자, 제어인자, 잡음인자, 신호인자, 오차인자 등으로 나눈다. 다구찌 기법에서는 개선을 위한 정도를 나타내는 측정치로 SN Ratio(신호대 잡음비, signal to noise ratio)를 제시하는데 잡음에 대한 제어 인자의 정도를 나타내는 것으로 SN Ratio가 클수록 개선이 잘 된 것으로 판단하며, 본 연구에서와 같이 망소특성의 SN Ratio는 다음과 같이 계산된다.

$$SN\ Ratio = -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2\right) \quad (1)$$

여기서, y : 목표치로서 고유진동수
n : 실험횟수

3.3 직교배열표를 이용한 실험계획법

직교배열표(Tables of orthogonal arrays)는 모든 경우의 실험 또는 해석을 할 수가 없기 때문에 적은 수의 실험으로 많은 효과를 찾으려는 목적으로 각 열이 직교가 되게 미리 만들어 놓은 표이다. 이 표를 이용하여 제어인자와 오차인자(또는 잡음인자)의 실험 또는 해석의 합리성을 추구하기 위해 사용되는 것으로 내측배열과 외측배열을 이용하였다.

본 연구에서는 제어인자로서 구조 형상관련 5가지를 고려하였으며 형상관련 인자와 각 인자별 수준을 Figure. 5와 Table 1에 각각 나타냈다.

또한 3수준 5인자를 가진 직교배열표 $L_{27}(3^5)$ 를 이용하여, 외측배열로서 잡음인자를 고려하였는데 이는 제어인자중 형상관련 3가지 인자를 고려하여 4가지로 추가 배열하여 총 108회의 해석을 수행하도록 하였으며 이를 Table 2에 나타냈다. 외측배열중 1은 내측배열의 수준을 의미하며, 2은 내측배열 수준의 5%를 추가한 값으로 정의하였다. 다구찌법을 이용한 해석 수행시, 잡음인자에 들어가는 실험에서와 같은 반복수행이 불가하므로 설계인자중 임의의 인자를 선정하여 잡음의 영향을 고려해 주는 것이다. 즉, 각각의 경우에 대해 4가지 잡음인자를 고려한 해석을 실시하였으며 그 특성치는 a~d로 구분하였다.

Table 1 Factors and levels

Level	A	B	C	D	E
1	-7.586	-7.142	-7.279	-7.143	-7.149
2	-7.587	-7.072	-7.051	-7.068	-7.065
3	-6.218	-7.176	-7.060	-7.179	-7.177
Delta	1.369	0.104	0.228	0.112	0.112
Rank	1	5	2	4	3

Table 2 Internal factor and external factor

Runs	Internal Factor					External Factor				
	A	B	C	D	E	A B C	1 2 2	1 2 2	2 1 2	2 2 1
1	1	1	1	1	1		a1	b1	c1	d1
2	1	1	2	2	2		a2	b2	c2	d2
3	1	1	3	3	3		a3	b3	c3	d3
4	1	2	1	2	3		a4	b4	c4	d4
5	1	2	2	3	1		a5	b5	c5	d5
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
27	3	3	3	2	1		a27	b27	c27	d27

4. 해석 결과 및 고찰

다구찌 실험계획법을 이용하여 바닥구조의 설계 물성치와 형상 관련 인자에 대한 유한요소해석을 실시하였다. 특히 바닥충격음의 경우 바닥 구조의 진동특성과 밀접한 관련이 있었는데, 본 유한요소해석은 과도해석의 가속도 피크치를 그 특성치로 선정하였으며 이에 대한 반응표, 주효과 및 교호작용에 대해 고찰하고자 한다.

Table 3 Response table for SN Ratio

Level	A	B	C	D	E
1	-7.586	-7.142	-7.279	-7.143	-7.149
2	-7.587	-7.072	-7.051	-7.068	-7.065
3	-6.218	-7.176	-7.060	-7.179	-7.177
Delta	1.369	0.104	0.228	0.112	0.112
Rank	1	5	2	4	3

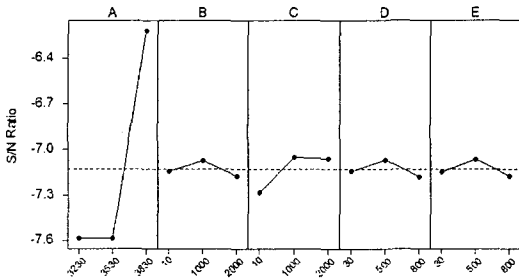


Fig. 6 Main effect plot for SN Ratio

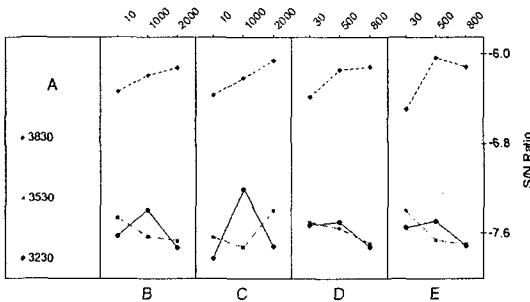


Fig. 7 Interaction plot for AB, AC, AD and AE

Table 3과 Figure 6은 선택된 특성치로부터 계산된 SN Ratio에 대한 각 인자 수준의 평균치를 나타내는 반응표와 각 인자에 대한 주효과를 나타낸다. 반응표의 Delta값은 각각의 인자로부터 가장 큰 평균에서 가장 작은 평균값의 차이로서 Delta, 값이 클수록 순위가 높아 그 영향도가 큰 것

으로 판단한다. 반응표와 주효과 결과로부터, 진동저감에 가장 큰 영향을 주는 것은 A로 매우 지배적인 영향을 미칠 수 있으며, 그 다음으로 C이고, 그 외 D, E, B는 비슷함을 보여 준다.

Figure 7은 A와 B, C, D, E 사이의 교호작용을 나타내는 것으로 다구찌법의 특성상 B, C, D, E 사이의 교호작용은 알 수 없다. 각 인자간 즉, AB, AC, AD, AE는 진동량에 대해 매우 복잡한 교호작용을 보여주고 있는데, 예를 들어 AB간 교호작용을 살펴보면, A가 3830일 경우에는 B가 2000일때 SN Ratio가 가장 높으며, A가 3530일 경우에는 B 값은 1000에서 SB Ratio가 가장 높은 설계치가 되는 것이다.

최적설계관점에서 바닥충격진동 저감을 위한 최적치는 $A_3B_2C_2D_2E_2$ 임을 알 수 있다. 이중 A를 제외하면, 침실3의 문 위치와 현관 위치, 그리고 베란다의 창틀 폭은 너무 크거나 작지 않은 적절한 크기를 가져야 함을 보여주는 것이다. 따라서 이러한 최적치를 적용할 경우 SN Ratio의 예측값은 기존의 2.45에서 1.97 [m/s^2]으로 저감되었다.

5. 결론

본 연구에서는 공동주택 바닥충격진동저감을 위해 주요 설계 인자를 선정하고 유한요소법과 다구찌법을 이용하여 최적설계치를 산정하였다. 다구찌법의 L_{27} 을 이용함으로써 A를 제외한 인자들간의 교호작용에 대한 충분한 고찰을 하지 못한 아쉬움이 있으나, 주어진 수준내 최적인자를 도출하여 진동저감을 위한 자료로 활용될 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 환경부 "차세대 핵심 환경 기술 개발 사업" (과제번호 : 2005-11002-0003-0)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) William W. Fearon, 1986, "Floating floors for impact and airborne noise control", SV. Sound and Vibration 20(10) pp.20~22.
- (2) Erwin H. Johnson, 1998, "Considerations in the performance of large structural optimization tasks", Proceedings of the 7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium - Part 1, pp.165~169
- (3) S. H. Seo and J. Y. Jeon, 2004, "Vibration analysis in reinforced concrete slab using the finite element method", Proceedings of ICSV11
- (4) 오재웅, 조용구 등, 2001, "다구찌법을 이용한 자동차 흡기계의 저소음화에 대한 연구", Vol.11, No.2, pp.234~240