

철골 조립식주택 바닥판 진동 평가에 관한 연구

김종성¹, 조민주², 김승훈^{3*}

A Study on Evaluation of Floor Vibration for Steel Frame Modular Housing

Jong-Sung Kim¹, Min-Joo Jo², Seung-Hun Kim^{3*}

Abstract: The steel frame modular housing of which the research and development has been actively carried out recently cannot be constructed through monolithic placement like the reinforced concrete deck of general structure due to the characteristics of construction method of production in the factory and assembly on the site. And floor vertical vibration and deflection caused by inhabitants' activities may become an important issue in the aspect of usability evaluation due to a decrease in the section size of member, a decrease in weight, and so on.

Therefore, this study evaluated the vibration performance of deck by using formula of AISC Design Guide 11(hereinafter AISC formula) which was practically used in general for modules where a stud was and wasn't installed at the center of beam in the longitudinal direction in the modular housing to be studied, and examined the applicability of AISC formula through comparison with the results of analysis using a general-purpose analysis program. On the basis of this, a structural cause for an error to occur between analysis result and AISC formula in the deck of module in which a stud was installed was analysed, and measures for considering this were suggested. Besides, an analysis model with the variables of measures for improving the floor vibration performance of modular housing to be studied was established. And measures having excellent vibration performance and economic feasibility were suggested through vibration response analysis and economic evaluation.

Keywords: Steel frame modular housing, Floor vertical vibration, Deflection, Stud, Economics, AISC Design Guide 11

1. 서 론

기존 우리나라의 주택건설 산업은 습식에 의한 그리고 노동 집약적인 현장생산방식으로 벽식구조 공동주택이 주를 이루었다. 이러한 현장에서 시공하는 방식은 최근 인건비 상승 및 건설폐기물로 인한 환경문제 등이 대두되면서 이에 대한 해결책으로 중·저층에서 조립식주택을 적용하기 위한 연구개발이 활발히 이루어지고 있다. 조립식주택은 철골부재로 이루어진 3차원 입체 구조모듈과 모듈의 내부를 구성하는 건축 설비 및 내장재 등의 70%이상을 공장에서 생산하고, 개별 모듈이 건설현장에서 수평, 수직으로 적층되고 연결되어 하나의 건축물이 형성되는 주택으로 해체 및 이동이 용이하여 재사용이 가능하고 공장생산으로 표준화 및 부품화가 가능한 장점을 가지고 있다.

이러한 조립식주택은 철골부재로 이루어진 각 모듈의 연결에 의해 구성되기 때문에 일반 철골조 건축물과 같이 철근콘

크리트 건축물 대비 부재 단면크기 감소 및 경량화 등으로 인하여 거주자의 활동에 의한 바닥판의 진동 및 처짐이 사용성 평가 측면에서 중요한 문제가 될 수 있다. 또한 조립식주택 바닥판은 공장에서 생산되고 운반되어 현장에서 모듈간 접합부에 의하여 조립되는 건설방식의 특성으로 인해 일반 건축물의 철근콘크리트 바닥판과 같이 일체타설 시공되지 못하며, 따라서 각 모듈의 바닥판은 개별적인 구조거동으로 인하여 진동 및 처짐에 더욱 취약하다고 할 수 있다.

바닥판 진동성능 평가에 대한 기존연구들을 살펴보면 국내 기준은 세부적인 평가방법이 제시되지 않아 AISC 설계지침서 11 및 ATC-1(1999), 일본건축학회 기준(AIJ, 1991) 등의 진동계산식이 사용되고 있으며, 그중 D.E Allen과 T.M Murray의 고유진동수 제안식을 적용하고 있는 AISC 설계지침서 11의 바닥판 진동계산식(이하 AISC 계산식)은 계산식이 간단하고 정확성이 비교적 뛰어나 실무 및 연구에서 주로 사용되고 있다. AISC 계산식에 관한 기존연구로는 합성 데크슬래브가 사용된 철골조 사무소건축물을 대상으로 AISC 계산식에 의한 결과와 실측된 데이터를 비교하여 기존 AISC 계산식에서 슬래브에 대한 처짐 및 고유진동수를 추가적으로 고려하는 방안이 제안된 바가 있으며(Park and Kim, 2000), AISC 계산식을 포함한 대표적인 4가지 유형의 진동응답 계산식을 대상

¹정회원, ㈜와이즈구조연구소 이사

²정회원, ㈜와이즈구조연구소 대표이사

³정회원, 한밭대학교 건축공학과 부교수, 교신저자

*Corresponding author: kimsh@hanbat.ac.kr

•본 논문에 대한 토의를 2016년 2월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 3월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

으로 고유진동수와 유효하중 적용방법에 따른 계산결과와 실험결과를 비교한 결과 AISC 계산식 오차율이 다른 계산식보다 가장 작은 것으로 연구된 사례(Lee, 2005)가 있다. 두 연구는 모두 보와 기둥이 연속되는 일반 철골조 건축물에서 한 층이 연속타설되는 일반 바닥판을 대상으로 하고 있어, 이 연구에서 대상으로 하는 조립식주택의 건설특성 및 바닥판의 구조적 특성과는 상이할 것으로 판단된다.

따라서 이 연구에서는 3차원의 입체 구조모듈로 구성되는 조립식주택 바닥판을 대상으로 실무에서 일반적으로 사용되고 있는 AISC 계산식을 이용하여 바닥판의 최대응답가속도를 계산하고, 범용 해석프로그램의 시간이력 해석결과와 비교를 통해 AISC 계산식의 적용성을 고찰하였다. 이를 토대로 모듈 유형 중 구조적 특성으로 인하여 AISC 계산식과 해석결과와의 오차가 크게 발생하는 원인을 분석하고 이를 고려하는 방안을 제시하였으며, 대상 조립식주택 바닥판에 대한 진동 성능 향상방안을 변수로 해석모델을 수립하고 진동 성능 및 경제성이 우수한 방안을 제시하고자 한다.

2. AISC 진동응답 계산식 고찰

AISC 설계지침서에서 제시하는 진동응답 계산식은 중량 0.7kN의 1인 보행시 발생하는 바닥판의 최대 응답가속도 값을 산정하는 방법으로 다음 식 (1)에 의하여 산정된 가속도가 건물의 용도에 따라 정해진 허용한계 이하가 되도록 하고 있다. 식 (2)에서 바닥판의 유효하중 (W)은 작은 보와 큰 보에 발생하는 변위를 고려하여 산정하며, 고유진동수(f_n)는 개별 보에 대하여 각각 계산한 후 식 (3)과 같이 조합된 고유진동수를 산정하게 된다. 보의 지점조건에 따른 고유진동수는 Table 1과 같다.

$$\frac{a_p}{g} = \frac{P_0 \cdot e^{-0.35f_n}}{\beta W} \leq \frac{a_0}{g} \quad (1)$$

$$W = \frac{\Delta_j}{\Delta_j + \Delta_g} W_j + \frac{\Delta_g}{\Delta_j + \Delta_g} W_g \quad (2)$$

$$1/f_n^2 = 1/f_j^2 + 1/f_g^2 \quad (3)$$

Table 1 Natural Frequency by Boundary Condition

Boundary	Pin-Pin	Fix-Free	Fix-Fix	Fix-Pin
f_n	$\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{EI}{mL^4}}$	$0.56 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}}$	$3.56 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}}$	$2.45 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}}$

E : Young's Modulus, I : Moment of inertia,
 \bar{m} : Unit mass of beam, L : Length of Beam

여기서, P_0 는 주거용도에 대하여 0.29 kN이며, W 는 바닥판 유효하중, β 는 바닥판감쇠비로 칸막이벽이 상하바닥판에 고정된 경우 0.05이다. a_p/g 는 중력가속도에 대한 바닥판 최대 응답가속도 비, f_n 은 바닥판 고유진동수 (Table 1), a_0/g 는 건물용도별 정해진 허용한계 가속도비율로서 주거용도에 대하여 0.5%g이다. Δ_j 및 Δ_g 는 각각 작은 보와 큰 보의 중앙부 처짐양(mm), f_j 및 f_g 는 작은 보와 큰 보의 고유진동수(Hz)이다.

3. 조립식주택 바닥판 진동성능 수식 및 해석적 평가

3.1 검토대상 조립식주택

검토대상 조립식주택의 단위모듈은 Fig. 1(a)와 같이 각형 강관 기둥과 모듈의 상·하부 바닥의 C-형강 보로 이루어진 철골프레임이 제작된 후 모듈의 하부바닥에 콘크리트 슬래브를 타설하고 내·외부 마감을 시공하여 완성된다. Fig. 1(b)와 같이 바닥 콘크리트 슬래브는 두께가 150 mm로 바닥 C-형강 보와 합성거동을 할 수 있도록 플랜지의 상부 50 mm에 슬래브 상면이 위치하도록 설치된다. 모듈의 각 부재 사이즈 및 적용 설계하중은 Table 2 및 Table 3에 각각 나타내었다.

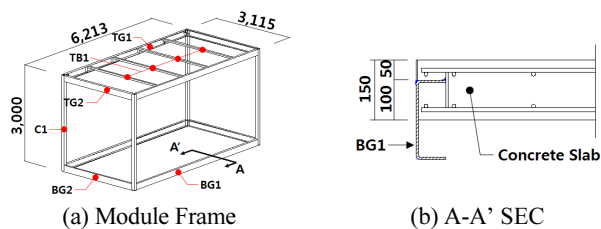


Fig. 1 Unit Module of Modular Housing

Table 2 Member Section

Name	Size	Steel Group
TG1, BG1	C-200×75×6t	SPA-H
TG2, BG2	C-200×75×6t	SS400
TB1	B-125×40×1.6t	SS400
C1	B-125×125×6t	SS400
SLAB	thk. = 150 mm	fck = 24 MPa

Table 3 Vertical Load

Load Type	Dead Load
Area Load	5.03 kN/m ²
Line Load	1.00 kN/m
BG1 Selfweight	0.156 kN/m

Table 4 Basic Conditions

L_x [mm]	L_y [mm]	E_s [MPa]	E_c [MPa]	β
6,213	3,115	2.05×10 ⁵	2.58×10 ⁴	0.05

3.2 바닥판 진동성능 수식적 평가

AISC 계산식 (1) 및 (2), (3)을 이용하여 대상 조립식주택 단위모듈에서 바닥판의 보행하중으로 인한 진동응답 가속도를 계산하였다. 대상 단위모듈의 바닥판은 보와 보 사이에 Beam 이 설치되지 않아 큰 보와 작은 보로 구분되지 않으므로 유효 하중 및 고유진동수는 장변방향 바닥보(BG1)를 대상으로 각각 다음 식 (4) 및 (5)과 같다.

$$W = W_j \tag{4}$$

$$1/f_n^2 = 1/f_j^2 \rightarrow f_n = f_j \tag{5}$$

바닥판응답가속도를 산정하기 위한 기본조건은 다음 Table 4와 같으며, 바닥에 설치되는 2개의 장변방향 보 TG1에 대한 합성단면이차모멘트 및 작용등분포하중은 다음과 같다.

$$n = E_s / 1.35E_c = 5.89$$

$$\text{슬래브 유효폭 } S = \text{MIN}[0.4L_x, L_y] = 2,485 \text{ mm}$$

$$I = 1.637 \times 10^8 \text{ mm}^4, w = 17.98 \text{ N/mm}$$

산정된 I 및 w 를 적용하여 보의 고유진동수 및 유효하중을 계산하고, 식 (1)에 대입하여 바닥판 응답가속도를 산정한 결과 0.76%g로 AISC 설계지침서의 주거목적 바닥판에 대하여 제시하는 허용값 0.5%g를 약 52% 초과하는 것으로 나타났다.

$$f_n = f_j = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{E_s \cdot I}{m \cdot L_x^4}} = 5.51 \text{ Hz}$$

$$W = W_j = w \times L_x = 112.0 \text{ kN}$$

$$a_p = \frac{P_0 \cdot e^{-0.35f_n}}{\beta W} g = 0.76\%g > a_0 = 0.5\%g$$

3.3 바닥판 진동성능 해석적 평가

AISC 계산식의 진동응답가속도 결과와 비교하기 위하여 대상 조립식주택에 대한 해석모델을 수립하고, AISC에서 제시하는 보행하중을 적용하여 바닥판 시간이력해석을 수행하

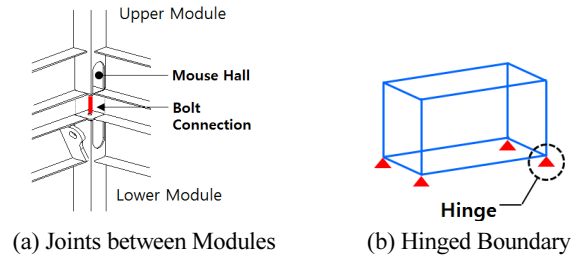


Fig. 2 Analysis Model Boundary Condition

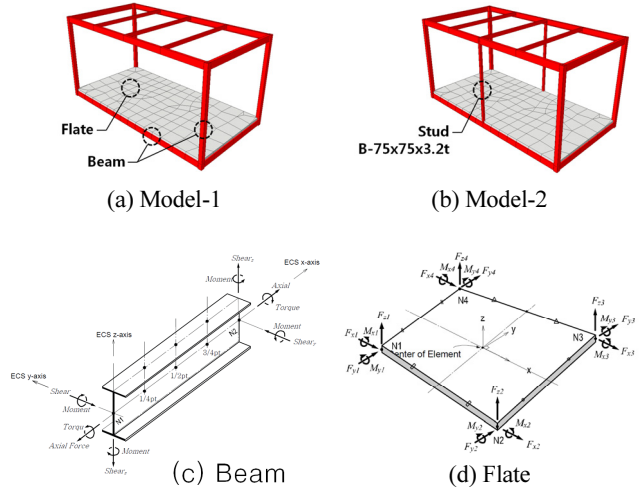


Fig. 3 Analysis Model Establish

였다. 대상 조립식주택은 바닥판을 포함한 개별 모듈이 공장 에서 생산되고 현장에서 Fig. 2(a)와 같이 기둥단부 고력볼트 접합으로 시공됨에 따라 각 바닥판은 불연속되며, 모듈간 보와 기둥은 부재 길이방향으로 발생하는 인장 및 압축하중, 직각방향의 전단하중에 대한 전달이 가능하나 휨하중에 대한 전달은 기대하기 어려울 것으로 판단된다. 따라서 대상 조립식주택의 바닥판 진동성능을 평가하기 위한 해석모델 수립은 단위모듈을 대상으로 하였으며, 해석모델의 지점조건은 Fig. 2(b)와 같이 기둥 하부에 힌지로 적용하였다.

진동해석을 위한 구조해석 프로그램은 국내에서 구조실무 시 범용적으로 사용되는 MIDAS GENw 2015(V2.4)을 사용하여 바닥판의 고유치해석 및 보행하중에 대한 시간이력해석을 수행하고 시간이력 해석시 동적응답의 수치계산은 모드중첩법이 적용되었다. 해석모델은 Fig. 3(a)와 같이 4개의 모서리 기둥이 상부바닥과 하부바닥 보로 연결되고 하부바닥에 철근콘크리트 슬래브가 설치된 모델(Model-1)과 Fig. 3(b)와 같이 Model-1에서 하부바닥의 처짐을 제어하기 위해 장변방향 스펠 중앙에서 상·하 보를 연결하고 수직 모듈간 연속되지 않는 셋기둥이 설치된 모델(Model-2)을 각각 수립하였다. 모듈내 보와 기둥은 2개의 절점에 의하여 정의되는 선형요소로서 Fig. 3(c)와 같이 각 절점당 세 개의 이동변위와 회전변위

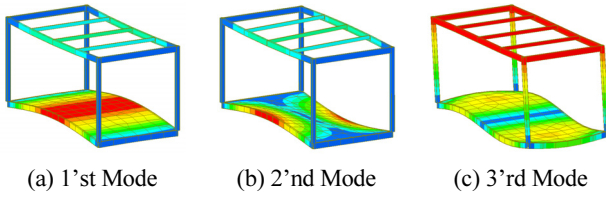


Fig. 4 Mode Shape about Model-1

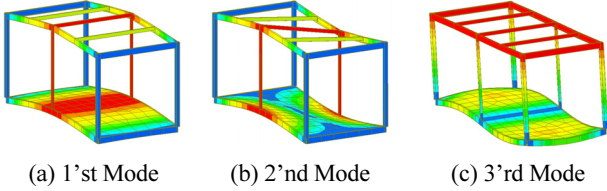


Fig. 5 Mode Shape about Model-2

Table 5 Eigenvalue Analysis about Model-1 and Model-2

		1'st Mode	2'nd Mode	3'rd Mode
Frequency	Model-1 ①	5.79 Hz	13.29 Hz	19.30 Hz
	Model-2 ②	6.79 Hz	14.38 Hz	19.30 Hz
② / ①		117%	108%	100%

성분을 갖는 보 요소로 모델화되었다. 바닥판은 Fig. 3(d)와 같이 동일평면상에 위치한 3개 또는 4개의 절점으로 정의되고 평면방향 이동변위와 면외방향 회전변위가 발생하는 판 요소로 모델화되었다.

수립된 Model-1 및 Model-2의 고유치해석에 의한 각 바닥판의 1~3차 모드형상을 Fig. 4 및 5에 각각 나타내었으며, 두 개 해석모델의 고유진동수를 각 모드별로 Table 5에 비교하였다. 셋기둥이 설치된 Model-2의 1차 및 2차 진동수는 셋기둥이 없는 Model-1 대비 각각 약 17%, 8% 증가하는 것으로 나타났으며, 3차에서 두 개 해석모델의 진동수가 동일하게 나타났다.

진동해석을 위한 보행하중의 모형화는 AISC 설계지침서에서 제시하고 있는 다음 식 (6)이 적용되었다. 식 (6)에서 보행하중의 진동수는 일반적으로 2.0 Hz 내외의 값으로서, 바닥판 고유진동수의 정수배를 적용하여 보행으로 인한 바닥판의 공진효과를 고려한다. Model-1 및 Model-2에서 각각 정의된 시간변화에 따른 보행하중을 Fig. 6(a) 및 6(b)에 나타내었다. 해석모델 바닥판에서 보행이동 경로는 바닥판 한쪽 끝에서 대각선 방향 바닥판 끝으로 보행하는 것으로 가정하였으며, 보행하중 작용간격은 성인의 보폭을 고려하여 750 mm로 적용하였다.

$$F_i = P\alpha \cos(2\pi ft) \quad (6)$$

$$\alpha = 0.83 \exp(-0.35f_n) \quad (7)$$

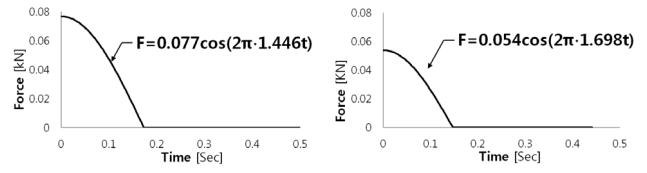


Fig. 6 Walking Excitation

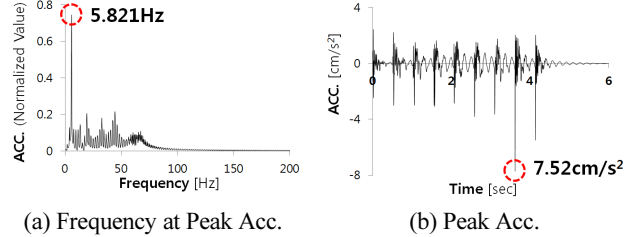


Fig. 7 Analysis Result of Model-1

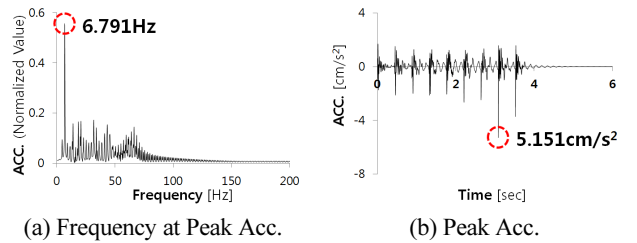


Fig. 8 Analysis Result of Model-2

Table 6 Vibration Analysis of Model-1 and Model-2

	f_n	Vibration Response Analysis	
		f_p	Peak Acc.
Model-1	5.79 Hz	5.82 Hz	0.77%g
Model-2	6.79 Hz	6.79 Hz	0.53%g

f_n = Frequency of Eigenvalue Analysis

f_p = Frequency at Peak Acc. Response

여기서, P 는 보행자 중량(0.7 kN), f 는 바닥판 고유주기 정수배로 정의되는 보행하중진동수이다.

Model-1 및 Model-2 바닥판에 보행하중을 각각 적용하여 시간이력해석을 수행하고, 바닥판 절점에서 최대응답가속도 및 최대응답가속도일 때 바닥판의 진동수를 Fig. 7 및 8에 각각 나타내었으며, 중력가속도에 대한 최대응답가속도 비를 Table 6에 나타내었다. 각 해석모델의 최대응답가속도에서 바닥판의 진동수는 바닥판의 고유치 해석에 의한 고유진동수와 잘 일치하는 것으로 나타나 최대응답가속도가 보행하중과 바닥판의 공진에 의한 값을 보여주고 있다. Model-1과 Model-2의 바닥판 응답가속도는 각각 0.77%g 및 0.53%g로 나타나 허용진동가속도 0.5%g를 각각 약 54% 및 6% 초과하는 것으로 나타났다.

Table 7 Comparison Analysis and Eq (1) of AISC

	Model-1 ①	Model-2 ②	AISC ③	③ / ①	③ / ②
Frequency	5.82 Hz	6.79 Hz	5.51 Hz	94.7%	81.1%
Peak Acc.	0.77%g	0.53%g	0.76%g	98.7%	143.4%

3.4 대상 조립식주택에 대한 AISC 계산식의 적용성 고찰

대상 조립식주택 바닥판에 대한 AISC 계산식의 적용성을 고찰하기 위하여, Model-1 및 Model-2 바닥판에 대한 진동해석결과와 앞서 수행한 AISC 계산식의 평가결과를 Table 7에 나타내었다. 검토결과, Model-1 해석결과 값에 대한 식 (1)의 바닥판 고유진동수 및 최대응답가속도 산정값은 각각 약 95%, 99%로 나타나, 셋기둥이 설치되지 않은 철골조 조립식주택에서 AISC 진동응답 계산식을 사용하여 별도의 해석모델 작성없이 바닥판의 진동성능을 비교적 정확하고 간편하게 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

반면 Model-2 해석결과 값에 대한 식 (1)의 바닥판 고유진동수 및 최대응답가속도 산정값은 각각 약 81% 및 143%로 비교적 큰 오차를 보이고 있는데, 이는 AISC 계산식이 보 양단부의 지점조건만을 고려하기 때문에 셋기둥으로 인한 바닥판의 고유진동수 변화가 제대로 반영되지 못한 결과로 사료된다. 따라서 셋기둥이 설치된 조립식주택 모듈에서 AISC 계산식을 사용하여 바닥판 진동성능을 예측하기 위해서는 셋기둥에 의한 응답가속도 감소효과를 고려하는 방안이 제시되어야 할 것으로 판단된다.

4. 셋기둥이 설치된 모듈에 대한 AISC 계산식 적용방안

앞서 AISC 계산식에 의한 바닥판 진동성능 예측은 셋기둥이 없는 Model-1의 해석결과와 잘 일치하는 것으로 나타난 반면, 셋기둥이 설치된 Model-2의 해석결과와는 오차가 비교적 큰 것으로 나타났다. 따라서 이 연구에서는 대상 조립식주택 모듈의 유형중 하나인 셋기둥이 설치된 모듈에 대한 바닥판 진동성능을 실무에서 간략히 예측하고자, AISC 계산식에서 셋기둥에 대한 영향을 고려하는 방안을 제시하고자 한다.

4.1 셋기둥이 설치된 바닥보의 고유진동수 산정

AISC 계산식 (1)에서 바닥판의 응답가속도를 산정하기 위해서는 바닥판을 지지하는 보의 고유주기를 산정하여야 하는데, 단면의 EI가 일정하고 등분포 질량이 발생하는 보의 고유주기는 에너지 보존 원리에 기반을 둔 레일라이 방법으로 간

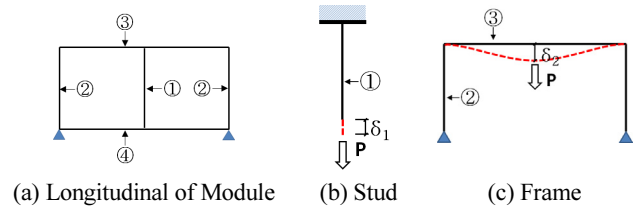


Fig. 9 Effective Stiffness of Stud and Frames

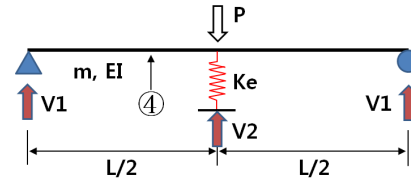


Fig. 10 Substitution Model of Floor Beam

략히 산정 가능하다. 레일라이 방법은 보의 고유진동수를 추정함에 있어 변위경계조건을 만족시키는 가정된 형상함수를 사용하게 되며, 이때 가정된 형상함수가 보의 모드형상을 얼마나 근사적으로 표현하느냐에 따라 고유진동수 정확도는 의존된다.

모듈의 장변방향에 셋기둥이 설치된 바닥보(④)의 형상함수를 합리적으로 가정하기 위하여, Fig. 9와 같이 기둥(②) 및 상부보(③)로 이루어진 골조(이하 상부골조)와 셋기둥(①)을 각각의 자유물체도로 표현하였다. 바닥보에 작용하는 하중으로 인하여 셋기둥위치에서 발생된 바닥보의 수직변형은 셋기둥의 축변형과 상부골조의 셋기둥위치에서 변위 합과 같다. 따라서 셋기둥 하부에서 발생된 하중(P)에 대한 상부골조와 셋기둥의 강성을 식 (8)과 같이 각각 정의하면 상부골조와 셋기둥에 대한 유효강성(K_e)은 식 (9)와 같다.

$$K_i = \delta_i / P \quad (8)$$

$$K_e = K_i K_j / (K_i + K_j) \quad (9)$$

셋기둥이 설치된 바닥보의 거동을 묘사하기 위하여, 상부골조와 셋기둥에 대하여 산정된 유효강성을 스프링요소로 치환한 바닥보(④)의 단순보모델을 Fig. 10에 나타내었다. 보의 전체길이에서 균일한 EI 및 질량을 갖는 치환 단순보모델에서 형상함수를 결정하기 위하여, 스프링요소가 설치된 L/2 위치에서 집중하중 P가 작용한다고 가정하면, 하중에 의하여 발생하는 정적처짐 및 보의 양끝단에 발생하는 반력(V_1)은 식 (10)과 같다. 하중에 의하여 발생된 최대운동에너지(E_{k0})와 변형으로 인한 최대위치에너지(E_{s0})는 각각 식 (11) 및 식 (12)

와 같이 주어진다. 에너지 보존법칙에 의한 레일라이 지수식을 이용하여 고유 각진동수(w_n)는 식 (13)과 같이 도출되며, 따라서 보의 고유진동수(f_n)는 다음 식 (14)와 같다.

$$u_x = \frac{V_1}{EI} \left(-\frac{1}{6}x^3 + \frac{L^2}{8}x \right), \quad V_1 = \frac{24EIP}{48EI + K_c L^3} \quad (10)$$

$$E_{k0} = \int_0^L \bar{m}(u_x)^2 dx = \frac{17}{20160} \frac{\bar{m} L^7 V_1^2}{(EI)^2} \quad (11)$$

$$E_{S0} = \sum P_j u_{xj} = \frac{PL^3}{24EI} V_1 \quad (12)$$

$$w_n^2 = \frac{\sum P_j u_{xj}}{\int_0^L \bar{m}(u_x)^2 dx} = \frac{35(48EI + K_c L^3)}{17\bar{m}L^4} \quad (13)$$

$$f_n = \frac{w_n}{2\pi} = 0.228 \sqrt{\frac{48EI + K_c L^3}{\bar{m}L^4}} \quad (14)$$

4.2 제안된 방안을 이용한 Model- 2 진동성능 수식적평가

제안된 방안의 검증을 위하여, 식 (14)를 이용하여 셋기둥이 설치된 Model-2 바닥보의 고유진동수를 산정하고, 고유진동수를 AISC 계산식 (1)에 적용하여 산정한 바닥판 최대응답가속도를 해석결과와 비교하였다. Model-2 바닥판 응답가속도를 산정하기 위한 기본조건 및 2개의 바닥보에 대한 합성단면이차모멘트, 작용 등분포하중은 3.2절과 동일하다. 셋기둥 및 상부 프레임에 대하여 각각 산정된 강성값 K_1 , K_2 는 아래와 같으며, 산정된 각각의 강성값을 식 (9)에 대입하고 바닥보와 동일하게 2개의 셋기둥에 대한 유효강성 K_c 을 산정하면 다음과 같다.

$$K_1 = 61,001 \text{ N/mm}, \quad K_2 = 919 \text{ N/mm}$$

$$K_c = K_1 K_2 / (K_1 + K_2) \times 2 = 1,810 \text{ N/mm}$$

산정된 유효강성값을 식 (14)에 적용하여 셋기둥이 설치된 바닥보의 고유진동수를 산정하고, 식 (1)에 고유진동수를 적용하여 산정한 최대응답가속도를 앞에서 Model-2 해석결과와 Table 8에 비교하였다. 검토결과, 앞의 Table 7에서 셋기둥에 대한 영향이 고려되지 않은 고유진동수 및 최대응답가속도 산정값이 해석결과와 비교하여 각각 약 81% 및 143%로 비교적 큰 오차를 보인 반면, 제안된 방안은 해석결과 대비 각각 약 92% 및 111%로 셋기둥에 대한 영향이 고려되지 않았을 때

Table 8 Comparison Analysis and Eq (1) of AISC using Eq (14)

	Model-2 ①	AISC ②	② / ①
Frequency	6.79 Hz	6.23 Hz	91.8%
Peak Acc.	0.53%g	0.59%g	111.3%

보다 해석결과에 근접한 결과를 나타내었다. 따라서 제안된 방안은 어느 정도 오차는 발생하고 있으나 대상 조립식주택의 셋기둥이 설치된 바닥판 진동성능을 실무에서 간단히 예측하는 방법으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 제안된 방안의 적용범위 고찰

이 연구에서는 셋기둥이 설치된 모듈에 대한 바닥판 진동성능을 실무에서 간략히 예측하고자 셋기둥에 의한 유효강성을 스프링요소로 치환한 바닥보 모델을 대상으로 레일라이 지수식을 이용하여 고유진동수 산정식을 제안하였다. 대상 조립식주택에서 셋기둥에 의한 유효강성의 크기 변화시 제안된 식의 적용범위를 고찰하고자, 유효강성 0~8,000 N/mm 범위에서 식 (14)를 이용하여 산정한 고유진동수와 Fig. 10의 2차원 단순보 해석모델의 고유치해석 결과를 Fig. 11에 비교하여 나타내었다.

검토결과, 유효강성 0~8,000 N/mm 크기범위에서 해석모델의 고유진동수 대비 식 (14)의 산정값은 약 101~102%로 오차는 크지 않은 것으로 나타났으나, 유효강성이 증가할수록 오차도 점차 증가하는 경향을 보여 제안된 식 (14)에서 유효강성의 적용범위를 제한할 필요가 있는 것으로 판단된다.

일반적으로 상부골조의 셋기둥위치에서 수직처짐에 대한 강성보다 셋기둥의 축강성이 매우 크므로 셋기둥 설치에 따른 유효강성의 크기는 상부골조의 부재길이 및 단면크기 등에 의하여 결정된다. 대상 조립식주택은 공장에서 단위모듈이 생산되어 현장으로 운송되어 조립되는 건설방식의 특성으로 인해 단위모듈의 크기 및 무게는 일정범위로 제한될 것으로 사료됨에 따라 부재의 길이 및 단면크기에 따른 유효강성 변화는 크지 않을 것으로 판단된다. 따라서 중·저층 조립식주택에서 셋기둥 설치에 따른 유효강성의 크기변화를 대상 조

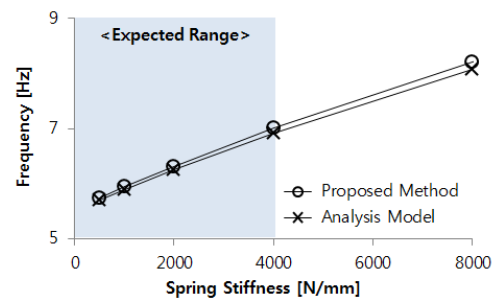


Fig. 11 Comparison Frequency of Eq. (14) and Analysis

립식주택에 대하여 산정된 유효강성 1,810 N/mm의 약 2배인 최대 4,000 N/mm로 가정하였을시, 셋기둥이 설치된 모듈 바닥판을 대상으로 제안된 방안을 적용하여 진동성능 예측이 가능할 것으로 사료된다.

5. 대상조립식주택 바닥판 진동성능 향상방안

대상 조립식주택에서 셋기둥이 설치되지 않은 모듈의 경우 시공 중 및 완공 후 하중에 대한 장변방향 하부바닥 보의 처짐이 허용 처짐을 초과하기 때문에 셋기둥이 설치된 모듈이 설계안으로 채택되었으며, 앞서 해당 모듈 바닥판을 대상으로 수직 및 해석적 진동성능 평가결과에서 허용진동가속도 0.5%g를 약 6~18% 초과하는 것으로 나타났다. 따라서 이 연구에서는 대상 모듈 바닥판의 진동성능이 허용값을 만족하면서 골조공사비가 경제적인 최적방안을 제시하기 위하여, 바닥판의 진동성능 향상방안을 변수로 다양한 해석모델을 수립하고 각 해석모델에 대한 진동성능 및 경제성을 검토하였다.

5.1 해석모델 변수

보행에 의한 바닥판의 수직 진동응답은 일반적으로 구조체의 강성 또는 감쇠비, 중량 증가에 따라 감소하게 되는데, 감쇠비의 경우 정량적인 예측 및 수학적인 묘사가 쉽지 않고 중량 증가의 경우 구조체의 단면증가를 수반하게 되므로 구조체의 강성증가 방법을 해석모델 변수로 적용하였다.

바닥판의 강성을 증가시키기 위하여 슬래브 또는 바닥보의 단면을 증가하는 방안과 Fig. 12와 같이 수직 적층된 하부모듈

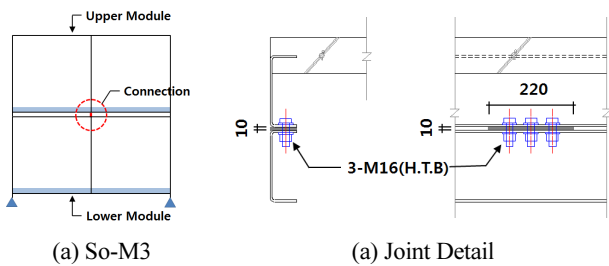


Fig. 12 Joint Detail of Coupled Beam of So-M3

Table 9 Variable of Analysis Model

Name	Stud	Variable[mm]
So-M1	○	Slab Thk. : 150 → 165
So-M2	○	Floor Beam : C-200×75×6 → C-200×90×8/13.5
So-M3	○	Coupled Beam by Adjacent Modules

천장보와 상부모듈 바닥보를 경간중앙에서 볼트 접합하는 3 가지 방안을 셋기둥이 설치된 모듈에 각각 적용하여 해석모델을 수립하고 보행하중에 의한 진동응답해석을 수행하였다. 적용된 진동성능 향상방안에 따른 각 해석모델명을 Table 9에 나타내었다.

5.2 바닥판 진동성능 향상방안 검토

각 해석모델의 보행하중에 대한 바닥판의 진동응답가속도 및 공중별(철골 및 콘크리트, 철근, 접합부) 물량, 2015년도 표준품셈 및 노임단가를 적용한 골조공사비를 Table 10에 나타내었다.

각 해석모델에 대한 진동성능 평가결과, 바닥판의 최대응답가속도는 0.37~0.48%g로 허용가속도 0.5%g를 모두 만족하는 것으로 나타났다. 각 진동성능 향상방안에 따른 경제성 평가결과, 바닥보 단면을 증가시킨 So-M2 모델의 공사비가 가장 크게 나타났으며 슬래브 단면을 증가시킨 So-M1 모델과 수직 적층된 상·하부모듈의 천장보와 바닥보를 경간중앙에서 볼트 접합하는 So-M3 모델은 공사비에 큰 차이를 보이지 않으나 So-M3 모델의 공사비가 조금 더 저렴한 것으로 나타났다. 따라서 대상 조립식주택에서 구조부재의 단면증가 없이 수직 적층된 상·하 모듈의 보를 경간중앙에서 볼트 접합하는 방안이 경제적이면서 바닥판의 진동성능을 향상시킬 수 있는 방법 중 하나가 될 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결론

이 연구에서는 보행에 대한 진동 사용성능 평가 시 실무에서 일반적으로 사용되고 있는 AISC 계산식을 이용하여 대상 조립식주택 바닥판에 대한 진동성능을 계산하고 범용해석프

Table 10 Vibration Performance and Construction Cost

Name	Peak Acc.[%g]	Quantity of Frame Construction					Total Cost
		Steel[kN]	Concrete[m ³]	Rebar[kN]	Welding[m]	Volting[0-M16]	
So-M1	0.48	9.17	3.20	0.89	5.6	-	₩ 2,012,719
So-M2	0.37	14.46	2.91	0.89	6.1	-	₩ 2,773,477
So-M3	0.45	9.20	2.91	0.89	5.6	6	₩ 1,996,816

로그래프 해석값과 비교를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 모듈 유형중 셋기등이 설치되지 않은 바닥판의 경우 해석 결과 값에 대한 AISC 식의 바닥판 고유진동수 및 최대응답 가속도 산정값이 각각 약 95%, 99%로 비교적 잘 일치하였으나, 셋기등이 설치된 바닥판의 경우 약 81% 및 143%로 비교적 큰 오차가 발생하였다.
- 2) 레일라이 지수식을 이용하여 경간중앙에 스프링요소가 설치된 보의 고유진동수 산정식 (14)를 도출하고 고유진동수 및 최대응답가속도를 산정한 결과, 해석결과 대비 각각 약 92% 및 111%로 나타나 셋기등에 대한 영향이 고려되지 않았을 때보다 해석결과에 근접한 결과를 나타내었다.
- 3) 스프링요소의 유효강성에 따른 식 (14)의 적용범위를 고찰한 결과, 대상 조립식주택의 건설특성 및 규모를 고려해 볼 때 셋기등에 의한 유효강성은 약 4,000 N/mm 범위에서 적용 가능할 것으로 판단된다.
- 4) 셋기등이 설치된 모듈에 대한 바닥판의 진동성능 향상방안을 변수로 다양한 해석모델을 수립하고 진동성능 및 경제성을 검토한 결과, 구조부재의 단면증가 없이 수직 적층된 상·하 모듈의 장변방향 보를 경간중앙에서 볼트 접합하는 방안이 경제적이면서 바닥판의 진동성능을 향상시킬 수 있는 방법 중 하나가 될 수 있을 것으로 판단된다.

이 연구에서 식 (14)를 이용하여 산정된 고유진동수는 셋기등에 의한 유효강성을 갖는 스프링요소가 설치된 2차원 단순 보 해석모델의 고유진동수와 비교하여 약 1~2% 오차를 보인 반면, 셋기등이 설치된 3차원 해석모델의 고유진동수와는 약 8% 오차를 보이고 있다. 이는 식 (14)에서 고유진동수 산정시 바닥판의 유효폭을 고려하여 보의 합성단면이차모멘트를 산정하게 되는데, 셋기등에 의한 유효강성 크기에 따라 바닥판 유효폭에 변화가 발생되기 때문으로 사료되며, 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부 주거환경 연구사업의 연구비지원 (과제번호 15AUDP-C068788-03)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

1. Allen, D.E., and Murray, T.M. (1993), Design Criterion for Vibrations due to Walking, *Engineering journal*, AISC, 4th Qtr, 177-129.
2. AIJ (1991), Guidelines for the Evaluation of Habitability to Building Vibration, AIJ.
3. AISC/CISC (2003), Steel Design Guide Series 11 Floor Vibrations due to Human Activity, AISC, Illinois.
4. Chopra, A.K. (2007), Dynamics of Structures, Prentice Hall, New Jersey.
5. ATC (1999), ATC Design Guide 1 Minimizing Floor Vibration, ATC.
6. Kim, W.K., and Park, J.K. (2000), Evaluation Method of Floor Vibration for Steel Structure Buildings, *Journal of Architectural Institute of Korea*, AIK, 16(11), 11-18 (in Korean, with English abstract).
7. KPI (2015), Comprehensive Estimation Information, KPI, Seoul.
8. Lee, S.S. (2005), Evaluation of the Vibration Response Formulas for Walking Induced Floor Vibration, *Journal of Architectural Institute of Korea*, AIK, 21(9), 27-34 (in Korean, with English abstract).
9. MIDAS (2015), <http://kor.midasuser.com/building>.

Received : 11/04/2015
 Revised : 11/11/2015
 Accepted : 11/18/2015

요 지 : 최근 연구개발이 활발히 이루어지고 있는 철골 조립식주택은 공장에서 생산되고 현장에서 조립되는 건설방식의 특성으로 인해 일반 건축물의 철근콘크리트 바닥판과 같이 일체타설 시공되지 못하게 되며 부재 단면크기 감소 및 경량화 등으로 인해 거주자의 활동에 의한 바닥판의 수직진동 및 처짐이 사용성 평가 측면에서 중요한 문제가 될 수 있다.

따라서 이 연구에서는 대상 조립식주택에서 장변방향 보 중앙에 셋기등이 설치된 모듈과 설치되지 않은 모듈을 대상으로 실무에서 일반적으로 사용되고 있는 AISC 설계지침서 11의 계산식(이하 AISC 계산식)을 이용하여 바닥판의 진동성능을 평가하고 범용해석프로그램을 이용한 해석결과와 비교를 통해 AISC 계산식의 적용성을 고찰하였다. 이를 토대로 셋기등이 설치된 모듈의 바닥판에서 AISC 계산식과 해석결과의 오차가 크게 발생하는 구조적 원인을 분석하고 이를 고려하는 방안을 제시하였다. 또한 대상 조립식주택 바닥판에 대한 진동성능 향상방안을 변수로 해석모델을 수립하고 진동응답해석 및 경제성평가를 통해 진동성능과 경제성이 우수한 방안을 제시하였다.

핵심용어 : 철골 조립식주택, 수직진동, 처짐, 셋기등, 경제성, AISC 설계지침서 11