

수직진동 사용성 기준을 고려한 바닥판 두께 제안

이민정 ^{1)*}·남상욱 ¹⁾·한상환 ¹⁾

¹⁾ 한양대학교 건축공학부

(2004년 12월 9일 원고접수, 2005년 8월 30일 심사완료)

Probability Based Determination of Slab Thickness Satisfying Floor Vibration Criteria

Min-Jung Lee ^{1)*}, Sang-Wook Nam ¹⁾, and Sang-Whan Han ¹⁾

¹⁾ Dept of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea

(Received December 9, 2004, Accepted August 30, 2005)

ABSTRACT

In current design practice, the thickness of the floor slab has been determined to satisfy requirement for deflection control. However, previous study shows that the floor thicknesses in residential buildings may not satisfy the floor vibration criteria, even though the thickness is determined by the serviceability requirements in current design provisions. Thus it is necessary to develop the procedure to determine slab thickness that satisfies the floor vibration criteria. This study attempts to propose slab thickness for flat plate slab systems that satisfies floor vibration criteria against occupant induced floor vibration(heel drop load). Two boundary conditions(simple and fixed support), three square flat plates(4, 6, 8m), and five concrete strength(18~30 MPa) are considered. Since there are large uncertainties in loading and material properties, probabilistic approach is adopted using Monte-Carlo simulation procedures.

Keywords : slab thickness, floor vibration, probabilistic approach, Monte Carlo simulation

1. 서 론

건설기술이 발전하면서 건물은 거주자에게 안전함 뿐만 아니라 쾌적함을 제공하도록 요구되고 있다. 이를 위하여 다양한 재료와 구조 시스템, 그리고 설계 방법이 개발되고 있다. 특히 내부 공간을 더욱 유연하고 사용자들의 의도에 따라 변경이 가능하도록 벽식 구조보다는 대공간화 된 골조 시스템을 많이 사용하고 있다. 하지만 대공간화 되면서 바닥의 스펙 길이가 늘어나 바닥 구조의 고유진동수(natural frequency)와 감쇠비(damping ratio)가 감소하는 경향이 발생하고, 이는 거주자들의 보행이나 뛰와 같은 내부 진동하중으로 발생하는 바닥진동으로 거주자들의 불쾌감과 불안감이 더 크게 할 수 있다.

현행설계기준(ACI 318¹⁾, 콘크리트구조설계기준²⁾에서는 사용성 기준으로 최대 처짐을 제한하고, 이를 만족시키는 슬래브의 최소 두께를 제시하고 있다. 이방향 슬래브의 경우 최소 두께를 경계조건에 따라 $l/30 \sim l/50$ 으로 정하고

있다. 하지만 공통 주택을 대상으로 바닥판의 수직진동 평가를 수행한 선행 연구(Han et al.³⁾의 결과에 따르면, 현행 기준에서 제시하고 있는 최소 두께로 설계된 이방향 슬래브가 수직진동 사용성 기준(AIJ⁴⁾, AISC⁵⁾을 만족하지 못하는 경우가 있는 것으로 나타났다. 따라서 수직진동에 대한 사용성을 고려한 바닥 최소 두께에 대한 검토가 필요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 뒤꿈치 충격하중으로 발생하는 수직 진동에 대하여 사용성 평가 기준을 만족하는 바닥판 두께를 제안하고자 한다. 바닥 구조는 4변 고정지지와 4변 단순지지의 두 가지 경계조건을 가지는 이방향 플랫플레이트 슬래브를 대상으로 하였고 수직진동 사용성 기준은 일본건축학회 기준⁴⁾을 사용하였다.

또한 본 연구에서는 재료 성질과 하중의 불확실성을 고려하기 위하여 Monte Carlo 시뮬레이션 방법을 도입하였다. 이는 불확실변수들(random variable)의 조합에 대한 반복해석을 수행하여 통계적 결과를 도출하는 것으로 수많은 진동해석이 요구된다. 본 연구에서는 진동해석의 반복 수행의 편의를 위하여 이방향 플랫플레이트를 등가 단자유도 시스템(equivalent SDOF system)모델로 치환하여 해석하였다. 본 연구의 진행 과정을 Fig. 1에 나타내었다.

* Corresponding author

E-mail : mjrabbit@ihanyang.ac.kr

©2005 by Korea Concrete Institute

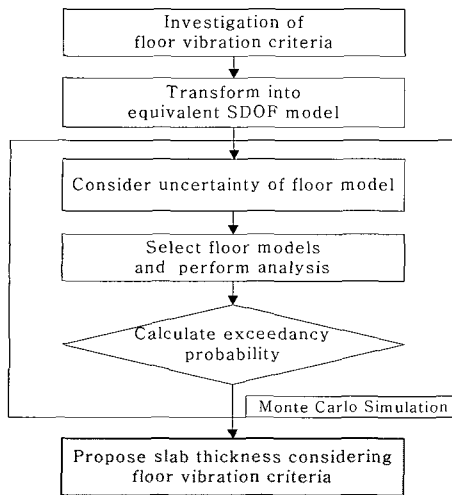


Fig. 1 Procedure flow chart

2. 해외 수직 진동 기준 고찰

수직진동에 대한 사용성 기준을 제시하고 있는 해외 기준으로는 Lenzen의 수정 Meister 곡선⁶⁾, Wiss와 Parmelee의 인지실험 연구⁷⁾, Allen과 Rainer의 연구⁸⁾에 근거한 CSA기준(1989), Murray와 Allen의 연구(1993)를 기본으로 한 AISC 기준⁵⁾, 여러 기준의 기본이 되는 ISO 기준(ISO 2631-2⁹⁾)등이 있다. 이들 기준은 진동 특성, 용도, 목적 등에서 서로 다른 특징을 가지고 있어 종합적인 수직진동 성능 평가가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 이들 기준을 비교 검토하여 제시한 일본건축학회의 건축물 진동에 관한 주거 성능 평가지침 및 해설⁴⁾을 사용하였다. 일본건축학회 기준⁴⁾은 Table 1에서 보이는 바와 같이 각 실의 용도와 작용하는 진동의 종류, 감쇠 정도에 따라 제한값을 제시하고 있다.

본 연구는 주로 주거 공간의 거실과 사무실 공간의 바닥판을 대상으로 하여, 바닥판의 마감하중을 고려하여 AISC 사용성 기준⁵⁾에 따라 감쇠비를 3%로 하였으며, 진동종별2에 해당하는 뒤꿈치 충격하중을 사용하였다. 따라서 슬래브의 진동으로 인한 가속도는 Fig. 2의 V-5 곡선 가속도 제한 값보다 작아야 한다.

3. 바닥 진동해석을 위한 등가단자유도 시스템

3.1 등가 단자유도 시스템

본 연구에서는 바닥판의 진동해석을 많이 반복해야하기 때문에 해석의 편의를 위해 등가의 단자유도시스템으로 변환하여 진동 응답을 구하였다. 단자유도시스템은 바닥판의 일차모드 응답만을 고려하는 시스템이다. 단자유도시스템의 운동방정식은 식(1)과 같다¹⁰⁾.

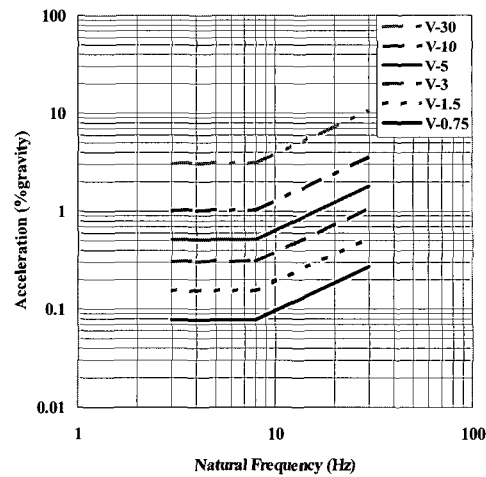


Fig. 2 Vibration criterion curve of AIJ

$$m_e \ddot{u}(t) + c_e \dot{u}(t) + k_e u(t) = P_e(t)$$

$$\ddot{u}(t) + 2\xi\omega_n \dot{u}(t) + \omega_n^2 u(t) = \frac{P_e(t)}{m_e} \quad (1)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_e}{m_e}}$$

여기서, u 와 ξ 는 각각 단자유도 시스템의 변위와 감쇠비를 나타내며, m_e , k_e , P_e 는 각각 등가 질량, 등가 강성, 등가 하중으로 각각 다음의 식(2)~(4)과 같이 결정된다.

① 등가 질량 산정 (m_e)

$$m_e = \int_0^L \int_0^L m [\Phi(x, y)]^2 dx dy \quad (2)$$

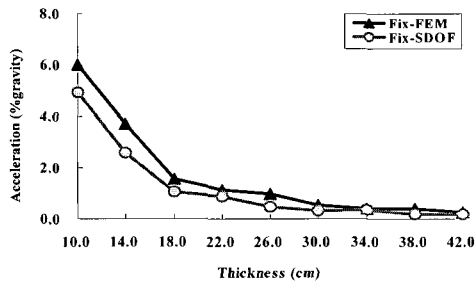
② 등가 강성 산정 (k_e)

$$k_e = \int_0^L \int_0^L D [\Phi''(x, y)]^2 dx dy \quad (3)$$

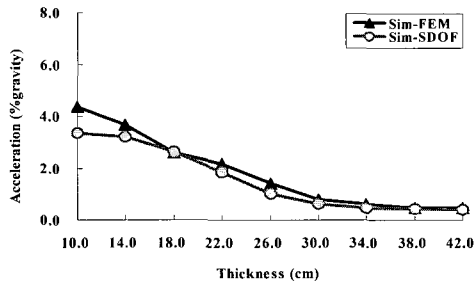
$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

Table 1 AIJ vertical vibration criteria

Vibration lank		Type1			Type2	Type3
		Rank I	Rank II	Rank III	Rank III	Rank III
Residence	Living room	V-0.75	V-1.5	V-3	V-5	V-10
	bed room					
Office	Reference room	V-1.5	V-3	V-5	V-10	V-30
	Office place	V-3	V-5	about V-5	about V-10	about V-30



(a) Fixed support



(b) Simple support

Fig. 3 Comparison results between FEM and SDOF model (span $l = 6$ m, $f_{ck} = 24$ MPa)

③ 등가 하중 산정 (P_e)

$$P_e = \int_0^L \int_0^L p(x,y) [\Phi(x,y)] dx dy \quad (4)$$

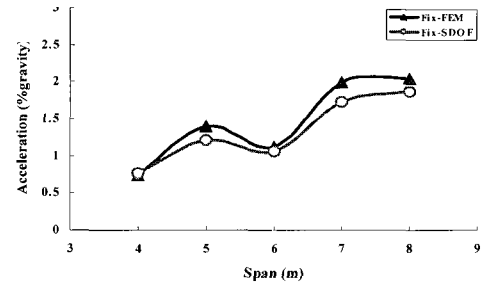
여기서, \bar{m} 은 단위 면적당 질량이고, ν 는 푸아송 비이며, $p(x,y)$ 는 슬래브 (x,y) 지점에서 바닥판에 작용하는 하중이다. 그리고 식(2)~(4)에서 $\Phi(x,y)$ 는 바닥판의 경계 조건에 따른 처짐 형상 함수를 나타낸다. 본 연구에서 사용하는 바닥 모델의 경계 조건인 4번 단순지지와 4번 고정지지의 바닥판의 형상 함수는 각각 아래의 식(5)와 식(6)과 같다.

$$\Phi_{sim}(x,y) = \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} \quad (5)$$

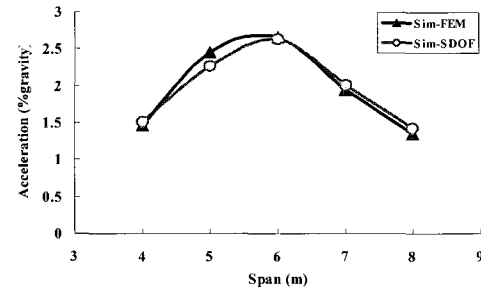
$$\Phi_{fix}(x,y) = \frac{1}{4} (1 - \cos \frac{2\pi x}{a}) (1 - \cos \frac{2\pi y}{b}) \quad (6)$$

3.2 등가 단자유도 시스템 타당성

단자유도 모델 해석의 타당성을 검증하기 위하여, 다양한 스패 길이로 가진 이방향 슬래브에 뒤꿈치 충격하중을 가진 원으로 하여 유한요소해석(MIDAS Gen)의 결과와 단자유도 모델 해석을 통해 얻은 최대 응답 가속도 값을 비교하였다. 4번 단순지지와 4번 고정의 경계조건에 대하



(a) Fixed support



(b) Simple support

Fig. 4 Comparison results between FEM and SDOF model (thickness 180 mm, $f_{ck} = 24$ MPa)

여 스패는 4~8m로 1m 간격으로, 두께는 100~420 mm 까지 40mm 간격으로, 콘크리트 강도는 18, 24, 30MPa로 하였다. 해석 결과는 바닥 두께별, 스패별, 강도별로 구분하여 비교하였는데 강도에 따른 최대 가속도의 변화는 크지 않아 바닥 두께와 스패에 대한 비교 결과만 나타내었다. Figs. 3과 4는 24MPa 강도에 대하여 6m 스패에 대하여 바닥 두께에 대한 비교 결과와 180mm 두께에 대하여 스패에 대한 비교 결과를 나타내고 있다. 바닥 두께와 스패에 따라 다소 차이가 있으나 전체 오차가 20% 이내로 비교적 잘 일치하였다.

4. 바닥 모델 선정과 변수의 불확실성 고려

콘크리트는 시멘트, 골재, 물의 혼합제로 교반 및 운반, 시공 등의 여러 환경적 요인으로 인해 강도와 탄성계수가 통계적으로 변한다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트의 재료적 불확실성을 고려하여 콘크리트의 압축강도와 탄성계수를 불확실 변수로 선정하였다. 바닥 모델에 적용하는 뒤꿈치 충격하중도 기존 연구에서 실험을 통해 하중 함수를 제시할 뿐, 확실한 정의가 이루어지지 않았다. 또한 실험도 여러 불확실적인 요소를 갖고 있다.

따라서 뒤꿈치 충격하중의 크기와 그 지속 시간도 불확실 변수로 선정하였다. 또한 바닥판의 마감도 같은 거실 공간이라도 사용되는 재료와 구조에 따라 다르므로 바닥판 위에 적용되는 고정하중도 일정한 값으로 정할 수 없다. 따라서 마감재에 따른 바닥판의 고정하중도 불확실

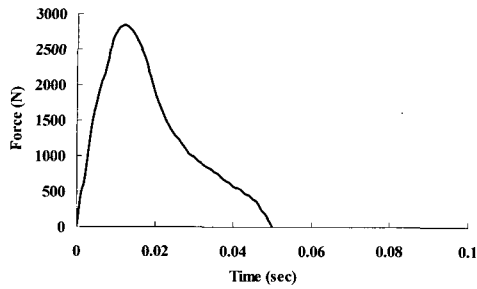


Fig. 5 Heel drop force function (Lenzen and Murray)

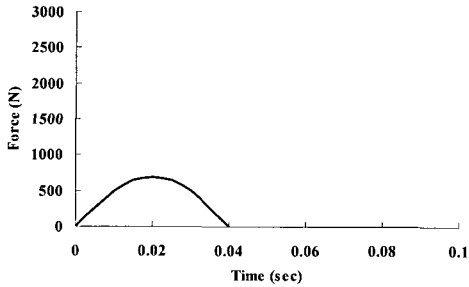
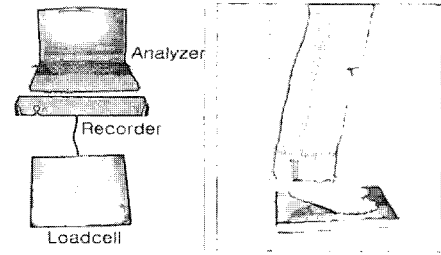


Fig. 6 Heel drop force function (AIJ)



(a) Measurement system (b) Heel drop loading

Fig. 7 Heel drop test

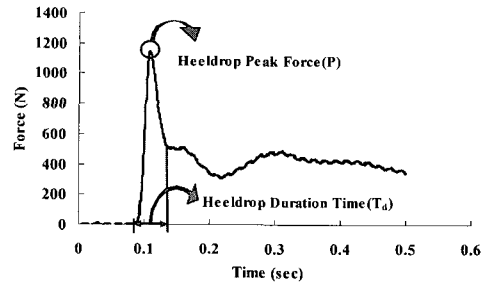


Fig. 8 Measured heel drop force function

변수로 선정하였다.

4.1 콘크리트 압축강도와 탄성계수

본 연구에서 불확실 변수로 선정된 콘크리트 압축강도와 탄성계수에 대한 통계적 특성은 Choi와 Scanlon¹¹⁾의 연구에서 제시한 값을 사용하였다. 이 연구에서는 콘크리트의 압축강도와 탄성계수의 평균값을 아래의 식(7), (8)과 같이 정의하고 있다.

① 콘크리트 압축강도 평균값 (MPa)

$$0.675f_{ck} + 7.6 \leq 1.15f_{ck} \quad (7)$$

② 콘크리트 탄성계수 평균값 (MPa)

$$4,700 \sqrt{f_{ck}} \quad (f_{ck} \leq 30) \quad (8)$$

그리고 콘크리트 압축강도와 탄성계수의 분포는 모두 정규분포 (Normal Distribution)를 따르며, 각각의 변동계수 값은 0.176과 0.119로 정의하였다.

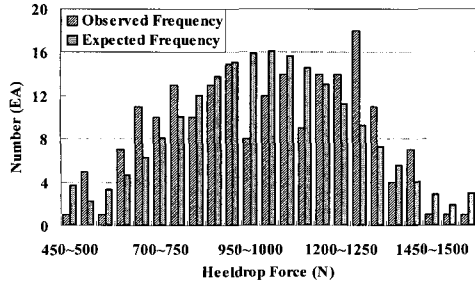
4.2 뒤꿈치 충격하중

뒤꿈치 충격하중은 기존 연구에서 다양하게 정의되고 있다. 그 중에서 Lenzen과 Murray¹²⁾의 연구와 일본건축학회 기준⁴⁾에서는 각각 Figs. 5, 6과 같이 시간에 대한 하중 크기의 그래프로 뒤꿈치 충격하중 함수를 제시하고 있다. Lenzen과 Murray¹²⁾의 뒤꿈치 충격하중은 하중의 최대값

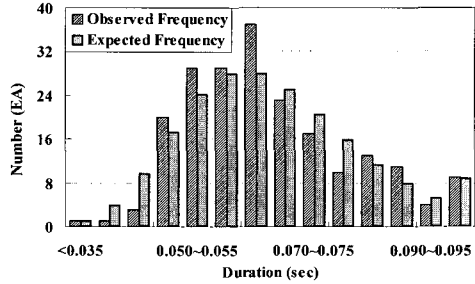
이 2850 N이고 지속시간이 0.05 초인 반면, 보행이나 달리는 동작에서 뒤꿈치 충격의 영향을 반영한 일본건축학회 기준⁴⁾의 하중의 최대값은 690 N이고 지속시간은 0.04 초로, 두 하중 함수에서 최대값 차이가 크게 나타나고 있다. 따라서 본 연구에서는 뒤꿈치 충격하중 실험을 실시하여 하중의 크기와 지속시간을 결정하였다. 뒤꿈치 충격하중 실험을 위하여 아래의 Fig. 7(a)와 같이 측정 시스템을 구성하였다. 측정 시스템은 실험자가 뒤꿈치 충격하중을 가력하는 로드셀과 로드셀로부터 시간에 따른 하중의 변화 데이터를 기록하는 레코더, 얻어진 데이터를 분석 및 저장하는 컴퓨터로 구성하였다. 하중 측정 센서인 로드셀에 뒤꿈치 충격하중을 가력 하는 방법은 Allen과 Rainer^{7,13)}의 연구에서 제시한 방법을 사용하였다. 이 연구들에 따르면 뒤꿈치 충격하중은 Fig. 7(b)에서처럼 700 N의 몸무게를 가진 사람이 50~60 mm 높이로 뒤꿈치를 들고 무릎을 편 상태에서 자연스럽게 체중을 뒤꿈치로 옮기며 자유낙하시키는 방법으로 로드셀을 가력 하는 것이다. 이 같은 실험을 10인이 20회씩 실시하여 뒤꿈치 충격하중의 시간에 대한 하중의 크기를 측정하였다. 실험자의 체중이 700 N이 아닐 경우는 아래의 식(9)을 이용하여 보정하였다.

$$P_e = P_0 \times \frac{700}{\text{체중}} \quad (9)$$

실험 결과 뒤꿈치 충격하중은 Fig. 8과 같은 하중 함수 형태로 나타났는데, 그래프에서 뒷부분의 하중이 0 이 아닌 일정한 값으로 유지되는 것은 뒤꿈치 충격 후 몸무게의 일부가 전달된 것으로 하중의 지속시간 t_d 는 정적하중



(a) Heel drop peak value



(b) Heel drop duration time

Fig. 9 Chi-square test results of heel drop force

이 기록되기 시작하는 부분까지로 볼 수 있다. 따라서 뒤꿈치 충격하중의 하중의 크기와 지속시간은 Fig. 8에 표기한 바와 같다. 뒤꿈치 충격하중의 하중크기와 지속시간의 통계적 특성을 알아보기 위해 각각의 실험 결과를 이용하여 Chi-square test를 수행하였다¹⁴⁾. Chi-square test의 결과, Fig. 9(a), (b)에 나타난 바와 같이 뒤꿈치 충격하중의 크기는 정규분포(Normal distribution)를 따르며, 평균과 변동계수 값은 1014.4 N과 0.243이었다. 그리고 뒤꿈치 충격하중 지속시간은 로그분포(Lognormal distribution)를 따르며, 평균과 변동계수 값은 0.0652 초와 0.215이었다.

각 바닥판의 진동해석 편의를 위하여 본 연구에서는 실험을 통해 얻어진 뒤꿈치 충격하중을 반사인곡선 형태로 단순화하여 적용하였다. 아래의 Fig. 10은 단자유도 시스템에 적용하기 위한 충격하중의 함수 형태를 나타낸다.

Table 2 Probability model of random variables

Variables	Distribution	Mean values	COV
Concrete strength (f_{ck}) [MPa]	Normal	$0.675f'_c + 7.6 \leq 1.15f'_c$	0.176
Elastic Young's modulus (E_c) [MPa]	Normal	$4,700\sqrt{f_{ck}} \quad (f_{ck} \leq 30)$	0.119
Heel drop force (P) [N]	Normal	1014.4	0.243
Heel drop duration (T_d) [sec]	Lognormal	0.0652	0.215
Dead load (W_d) [Pa]	Normal	2003.1	0.314

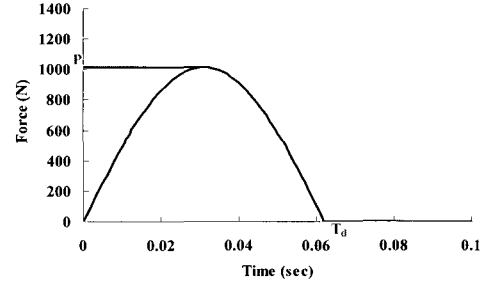


Fig. 10 Applied heel drop force function

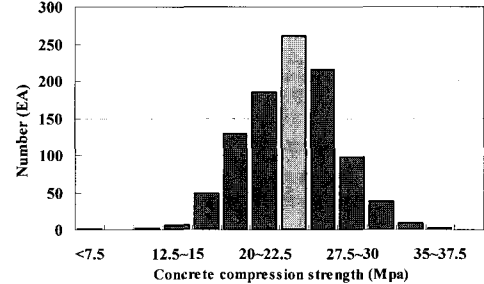


Fig. 11 Random number generation for concrete compressive strength

4.3 마감하중 및 불확실 변수들의 난수 생성

본 연구에서는 두께 제한의 범위를 주거공간의 거실을 대상으로 하였다. 바닥에 작용하는 마감하중에 대한 통계적 특성을 알아보기 위해 시공 회사에서 사용하고 있는 철근콘크리트 아파트 거실의 바닥 마감하중 데이터들을 조사하였다, 이 데이터로 Chi-square test를 실시한 결과, 마감하중은 정규분포(Normal distribution)를 따르며, 평균과 변동계수 값은 2003.1 Pa과 0.314이었다. 본 연구에서 불확실성을 고려한 각 변수들의 분포와 평균값, 변동계수는 아래의 Table 2와 같다.

본 연구에서는 바닥판의 불확실성을 고려한 신뢰성 분석을 위하여 Monte Carlo Simulation을 수행하였다¹⁴⁾. 이를 위해 불확실 변수의 통계적 특성을 이용하여 각 불확실 변수에 대해 난수(Random number)를 1000개씩 생성하였다. Fig. 11은 바닥의 콘크리트 압축강도가 24 MPa일 때 평균과 변동계수를 통해 만든 난수들의 분포이다.

5. 바닥판의 단자유도 진동해석

5.1 바닥판 모델 선정

바닥 모델의 선정은 기존 RC 아파트의 거실 공간과 일반 사무실 공간의 크기를 반영하여 4, 6, 8m로 결정하였다. 그리고 바닥판의 콘크리트 압축강도는 바닥판에 주로 사용되고 있는 강도인 18~30 MPa로 결정하였고, 바닥 두께는 현행 사용성 기준인 콘크리트구조설계기준²⁾을 반영

Table 3 Representative slab model

Conditions	Content
Span(l) (m)	4, 6, 8 (3)
Concrete compressing strength (MPa)	18, 21, 24, 27, 30 (5)
Thickness (mm)	100~420 (17)
Boundary condition	4 simple support, 4 fixed support (2)

Table 4 Summary of analysis results fck = 24 MPa

Span (m)	Thickness (mm)	Mean value a_p (%gravity)	
		Simple	Fixed
4	100	7.486	3.636
	180	1.809	0.993
	260	0.792	0.462
	340	0.438	0.262
	420	0.279	0.172
6	100	3.403	4.746
	180	2.512	1.341
	260	1.176	0.567
	340	0.576	0.310
	420	0.350	0.196
8	100	1.414	2.519
	180	1.405	1.730
	260	1.145	0.764
	340	0.790	0.375
	420	0.489	0.232

하여 100~420 mm까지 20 mm 간격으로 17개를 적용하였다. 그리고 경계 조건은 4변 단순지지와 4변 고정지지로 하여, 총 510개(3×5×17×2)의 바닥 모델을 고려하였다. Table 3에 바닥 모델 선정 범위를 정리하였다.

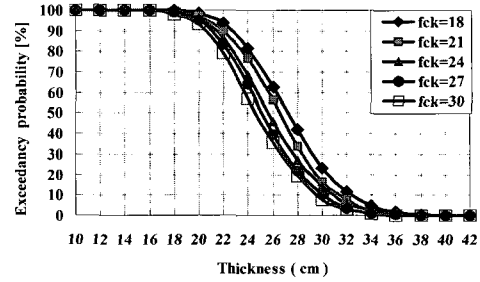
5.2 진동 해석 결과

본 연구에서는 Table 3의 조건들로 형성된 510개의 바닥 모델에 대하여 Table 2의 불확정변수 조합 1000개를 재료 특성과 하중 특성으로 하여 진동해석을 수행하고 이와 같은 해석을 10회 실시하여 총 5,100,000번(510×1000×10) 수행하였다. 그 결과로 얻어진 최대 응답가속도의 평균값을 콘크리트 강도 24MPa에 대하여 Table 4에 요약하였다. 콘크리트 강도에 대한 각 모델의 최대 응답가속도의 분포는 콘크리트 강도가 증가함에 따라 최대 응답가속도 값이 감소하는 경향을 보이고, 스패에 따른 최대 응답가속도 평균값의 경우 두께에 따라 Table 4에 보이는 바와 같다.

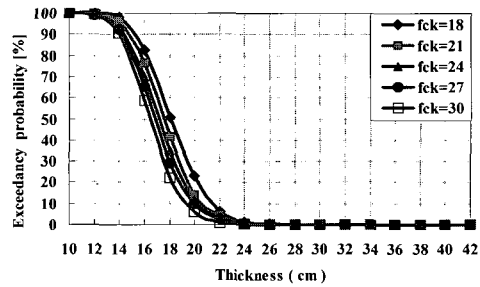
6. 확률을 기초로한 바닥 두께 제안

뒤꿈치 충격하중으로 인한 바닥 진동의 최대 응답가속도(a_p)가 일본건축학회 기준(1991)의 제한값(a_{ALL})을 초과할 확률은 다음과 같이 표현 할 수 있다¹⁴⁾.

$$P_{Excess} = P(a_p > a_{ALL}) \tag{10}$$



(a) Simple support



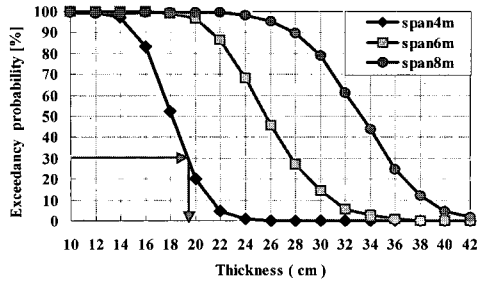
(b) Fixed support

Fig. 12 Exceedancy probability according to concrete strength for span length $l=6$ m

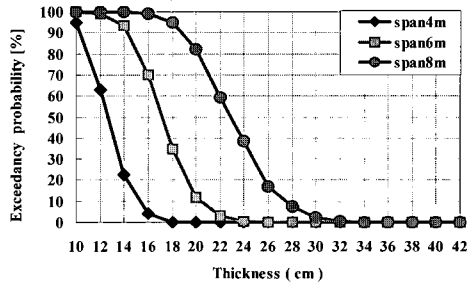
바닥판 모델 각각에 대한 1000개의 진동해석 결과를 이용하여, 그 최대 응답가속도 값(a_p)이 일본건축학회 기준(1991)의 제한값(a_{ALL})을 초과하는 수(n)를 세어 초과확률을 계산하고 ($=n/1000$), 위 절차를 10회 반복 실시하여, 그 평균값으로 초과 확률을 결정하였다. Fig. 12는 바닥 모델 중 스패의 길이가 6m일 경우, 4변 단순지지와 4변 고정지지에서의 콘크리트 압축강도에 따른 두께별 초과 확률을 나타낸 것이다. 단순지지의 경우는 두께가 스패의 $l/4 \sim l/17$ 인 경우에 일본건축학회 기준(1991)의 제한값(a_{ALL})을 초과할 확률이 0%에 도달하였으며, 고정지지일 경우에는 두께가 스패의 $l/18 \sim l/25$ 의 범위인 경우에 제한값을 초과할 확률이 0%이 되는 것으로 나타났다. 그리고 콘크리트의 압축강도가 증가함에 따라 초과 확률은 감소하는 경향을 보였다. Fig. 13은 콘크리트의 압축강도가 24 MPa일 때, 바닥 모델의 크기에 따른 두께별 초과 확률을 나타내었다. 단순지지와 고정지지 모두 바닥판 크기의 증가에 따라 초과 확률이 감소하는 경향을 보였다. 본 연구에서는 각 스패 길이와 콘크리트 강도를 변수로 하여 다양한 초과 확률(10%, 20%, 30%, 40%)에 대하여 바닥 두께를 제안하였다. 각 초과 확률에 대한 두께는 Fig. 13(a)에서와 같이 선정보간 하여 얻었다. Tables 5와 6에서 각 경계조건에 따른 초과 확률을 나타내었다.

7. 결 론

본 연구에서는 바닥판 수직 진동 사용성 평가 기준 값



(a) Simple support



(b) Fixed support

Fig. 13 Exceedancy probability according to span length for concrete strength $f_{ck} = 24$ MPa

(a_{ALL})을 초과하는 확률에 대하여 최소 두께를 제안하였다. 수행한 연구에 대한 결론은 다음과 같다.

- 1) 뒤꿈치 충격하중 실험을 실시한 결과, 하중의 크기의 평균값은 기존의 Lenzen과 Murray(1969)가 제시한 2850 N의 하중과 일본건축학회(1991)에서 제시한 690 N의 하중 사이 값인 1014.4 N의 하중 크기를 가지고 있는 것으로 나타났으며, 평균 지속시간은 기존 연구에서 제시된 뒤꿈치 충격하중의 지속시간보다 긴 0.0652초임을 알 수 있었다.
- 2) 불확실 변수로 Chi-Square Test를 실시한 결과, 뒤꿈치 충격하중의 하중 크기는 정규분포(Normal distribution)를 따르며 평균값은 1014. N, 변동계수는 0.243의 값을 나타냈다. 하중 지속시간은 로그정규분포(Lognormal distribution)를 따르며 평균값은 0.0652초, 변동계수는 0.215이었다. 그리고 바닥판의 고정하중은 정규분포(Normal distribution)를 따랐으며, 평균값은 2003.1 Pa, 변동계수는 0.314이었다.
- 3) 본 연구에서는 뒤꿈치 충격하중에 의한 바닥 수직진동에 대하여 일본건축학회 기준(1991)의 제안치를 초과하는 확률(10%, 20%, 30%, 40%)에 대하여 두께를 제안하였다. 예상한 바와 같이 동일한 조건의 슬래브인 경우 콘크리트 압축강도가 증가함에 따라 초과 확률은 감소하는 것으로 나타났으며, 스패 길이의 증가에 따라서는 초과 확률도 증가하는 것으로 나타났다. 4변 단순 지지의 경우 두께가 스패 길이의 $l/14 \sim l/17$ 에서, 4변

Table 5 Proper minimum thickness (simple support)

Span length (m)	f_{ck} (MPa)	Exceedancy probability (%)			
		10	20	30	40
4	18	$l/18.2$	$l/19.0$	$l/19.8$	$l/20.4$
	21	$l/18.5$	$l/19.4$	$l/20.2$	$l/20.9$
	24	$l/18.8$	$l/20.0$	$l/20.6$	$l/21.3$
	27	$l/19.2$	$l/20.3$	$l/21.0$	$l/21.7$
	30	$l/19.6$	$l/20.6$	$l/21.4$	$l/22.2$
6	18	$l/18.5$	$l/19.7$	$l/20.5$	$l/21.3$
	21	$l/19.1$	$l/20.3$	$l/21.1$	$l/21.9$
	24	$l/19.3$	$l/20.6$	$l/21.7$	$l/22.5$
	30	$l/20.3$	$l/21.5$	$l/22.5$	$l/23.4$
8	18	$l/20.0$	$l/20.9$	$l/21.6$	$l/22.3$
	21	$l/20.4$	$l/21.3$	$l/22.1$	$l/22.8$
	24	$l/20.7$	$l/21.8$	$l/22.6$	$l/23.3$
	30	$l/21.4$	$l/22.6$	$l/23.6$	$l/24.3$

Table 6 Proper minimum thickness (fixed support)

Span length (m)	f_{ck} (MPa)	Exceedancy probability (%)			
		10	20	30	40
4	18	$l/25.2$	$l/26.5$	$l/27.9$	$l/29.1$
	21	$l/25.9$	$l/27.5$	$l/29.0$	$l/30.0$
	24	$l/26.1$	$l/28.0$	$l/29.3$	$l/30.5$
	27	$l/26.6$	$l/28.8$	$l/29.9$	$l/31.0$
	30	$l/27.4$	$l/29.2$	$l/30.3$	$l/31.5$
6	18	$l/27.9$	$l/29.5$	$l/30.8$	$l/32.0$
	21	$l/28.8$	$l/30.7$	$l/31.8$	$l/33.1$
	24	$l/29.4$	$l/31.1$	$l/32.6$	$l/33.9$
	27	$l/30.0$	$l/31.7$	$l/33.4$	$l/34.5$
	30	$l/30.8$	$l/32.8$	$l/34.1$	$l/35.2$
8	18	$l/27.9$	$l/29.4$	$l/30.7$	$l/31.8$
	21	$l/28.9$	$l/30.6$	$l/31.8$	$l/33.1$
	24	$l/29.1$	$l/31.1$	$l/32.3$	$l/33.6$
	30	$l/29.8$	$l/31.7$	$l/33.2$	$l/34.3$

고정지지의 경우 스패 길이의 $l/18 \sim l/25$ 인 경우에 초과 확률이 0%에 도달하였다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 2003년 건설기술연구개발사업으로 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. American Concrete Institute, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary (ACI 318R-02)*, American Concrete Institute, 2002, pp.102~106.
2. 한국콘크리트학회, “콘크리트구조설계기준·해설”, 한국콘크리트학회, 2003, pp.79~85.

3. 한상환, 이민정, “기존 아파트 바닥의 수직진동 성능평가”, 콘크리트학회 논문집, 16권 2호, 2004. 4, p.221~228.
4. Architectural Institute of Japan, *Guidelines for The Evaluation of Habitability to Building Vibration*, Architectural Institute of Japan, 1991, pp.1~10.
5. Murray, T. M., Allen, D. E., and Unger, E.E., “Floor Vibration Due to Human Activity”, *AISC Steel Design Guide Series*, No.11, AISC, 1997, pp.1~10.
6. Lenzen, K. H., “Vibration of Steel Joist Concrete Slab Floors”, *Engineering Journal*, Vol.3, No.3 1966, pp.133~136.
7. Wiss, J. F. and Parmelee, R. A., “FHuman Perception of Transient Vibrations”, *Journal of Structural Division*, Vol.100, No. ST4, ASCE, Apr. 1974, pp.773~787.
8. Allen, D. E. and Rainer, J. H., “Vibration Criteria for long-span Floors”, *Canadian Journal of Civil Engineering*, National Research Council of Canada, Vol.3, No.2, Jun. 1976, pp.165~173.
9. International Organization For Standardization, *Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration- Part 2: Continuous and shock-induced vibration in buildings*, ISO2631-2, 1989, pp.1~11.
10. Szilard, R., *Theory and Analysis of Plate : Classical, Numerical and Engineering Method*, Prince-Hall, 1974, pp.408~409.
11. Choi, B. S., Oh, B. H., and Scanlon, A., “Probabilistic Assessment of ACI 318 Minimum Thickness Requirements for One-way Members”, *ACI Structural Journal*, Vol.99, NO.3, 2002, pp.344~351.
12. Lenzen, K. H. and Murray, T. M., *Vibration of steel beam concrete slab floor systems*, Dept. of Civil Engineering, University of Kansas, Lawrence, Kans., Report No.29, 1969.
13. Foschi, R.O., Neumann, G.A., Yao, F., and Folz, B., “Floor Vibration Due to Occupants and Reliability-Based Design Guidelines”, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol.22, 1995, pp.471~479.
14. Ang, A. H-S and Tang, W. H., *Probability Concepts in Engineering Planning and Design Volumn I, II*, Wiley, 1990, pp.274~332.

요 약

건설 재료와 기술의 발달로 건축물이 장스팬화·경량화 되어 가고 있다. 이로 인해 건축물 바닥의 고유진동수(Frequency)와 감쇠비(damping ratio)가 감소함에 따라 거주자들의 바닥판의 수직진동에 대한 문제가 발생하고 있다. 그러나 현행 사용성 기준은 바닥판의 최대 정적 처짐에 의해 결정하고 있다. 하지만 선행연구(Han et al., 2003)에서 현행 기준을 만족하는 바닥이 수직진동에 대한 사용성 기준을 만족하지 못하는 것을 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 거주자들의 뒤꿈치 충격하중에 대한 수직진동 사용성 기준을 만족하는 바닥 두께를 제안하고자 하였다. 슬래브 재료의 특성과 뒤꿈치 충격하중 및 마감 고정하중의 불확실성을 고려하기 위해 Monte Carlo Simulation을 사용하여 확률적으로 접근하였다. 그 결과 4변 단순지지의 경우 두께가 스패 길이의 1/14~1/17에서, 4변 고정지지의 경우 스패 길이의 1/18~1/25인 경우에 초과 확률이 0%에 도달하였다.

핵심용어 : 바닥두께, 바닥 수직진동, 확률적 접근, Monte Carlo Simulation