수직진동 사용성을 고려한 플랫플레이트 두께 제안

Proposing the Slab Thickness that Satisfies the Vertical Floor Vibration Criteria for Several Sizes of Flat Plate Floor System

이 민 정* 한 상 환**
Min Jung Lee Sang Whan Han

ABSTRACT

The floor thickness in residential buildings may not satisfy the floor vibration criteria even though the thickness is determined by the serviceability requirements in current design provisons. Thus it is necessary to develop the procedure to determine slab thickness that satisfies the floor vibration criteria. In this study provide the methods to determine the slab thickness that satisfies the vertical floor vibration criteria for several sizes of flat plate floor system. Randomness inherent in young modulus of concrete and heel drop intensity was accounted. For this purpose Monte Carlo simulation procedure was adopted.

1. 서론

최근 건축구조물은 고강도 경량 재료의 사용으로 고층화 대공간화 추세에 있다. 대공간 및 경량 바닥구조는 감쇠비(damping ratio), 진동수(frequency)의 감소를 초래해 바닥진동으로 인한 사용자들의 불쾌감 혹은 불안감을 발생시킬 수 있다. 그런데 현행 기준에서는 수평 부재의 경우 정적 처짐에 대한 사용성만을 고려하고 있어 수직진동에 대한 사용성을 고려한 적절한 최소두께 검토가 필요하다.

본 연구에서는 길이가 4m, 6m, 8m인 정사각형의 바닥을 대상으로 하여 수직진동에 대한 사용성 조건에 적합한 두께를 제안하고자 한다. 이는 기존 아파트에서 문제가 발생할 수 있는 거실부분의 크기를 고려하여 선정한 것이다. 사용한 진동원은 뒤꿈치 충격하중으로 슬래브 중앙에 작용하는 것으로 가정하였으며, 수직진동에 대한 제한값은 주거용 건물의 경우 보행하중에 대한 최대가속도를 0.5%g로 제한하는 AISC-11(1997) 기준을 적용하였다. 또한 콘크리트 재료의 불확실한 역학적 특성과 하중 자체의 불확실성을 고려하기 위하여 본 연구에서는 탄성계수, 하중크기를 불확실변수(Random Variable)로 가정하여 Monte Carlo Simulation을 수행하였다. 이를 이용하여 바닥 크기 및 콘크리트 탄성계수, 하중 크기를 변수로 하여 진동해석과 신뢰성 분석을 수행하였다.

2. 불확정 변수의 분포함수 결정

* 정회원, 한양대학교 건축공학과 연구원
** 정회원, 한양대학교 건축공학과 부교수

2.1. 불확정 변수 탄성계수에 대한 분포함수 설정

콘크리트의 압축강도가 $300kgf/cm^2$이하이고, 단위중량 w_c의 값이 $2.3tf/m^3$인 경우 탄성계수 E_c는 $E_C=15,000\sqrt{f_{ck}}$ (kgf/cm^2)로 사용할 수 있다. 따라서 콘크리트의 탄성계수는 압축강도에 따라 결정되므로 압축강도에 대한 분포함수 설정이 우선되어야 한다. 콘크리트 압축강도 및 탄성계수의 분포함수는 Choi, Oh, Scanlon의 연구(2002)에서 조사된 자료를 따랐다. 콘크리트 압축강도와 탄성계수는 정상분포를 따르며, 압축강도의 평균값은 식 (1)과 같고, 변동계수(COV)는 0.176이다. 본 연구에서는 콘크리트 압축강도 $f_{ck}=240kgf/cm^2$를 고려하여 탄성계수의 불확정 해석 변수를 산정하였다. 이렇게 생성된 탄성계수의 평균값은 $229,946kgf/cm^2$, 변동계수(COV)는 0.065이다.

$$\left.\begin{matrix}0.675f_{cf}+77\\1.15f_{ck}\end{matrix}\right\}\text{(작은값 사용)} \qquad (1)$$

2.2. 불확정 변수 뒤꿈치 충격하중의 분포함수 결정을 위한 실험

뒤꿈치 충격하중의 형태는 Lenzen과 Murray(1969)의 연구와 일본건축학회 기준(1991)에서 제시되어 있다. Lenzen과 Murray(1969)의 뒤꿈치 충격하중은 지속 시간이 0.05초이고 하중의 최대값이 3000 N인 반면, 일본건축학회 기준(1991)의 경우 지속 시간이 0.04초이며, 최대값은 700 N으로, 두 하중함수의 차이가 크게 나타나고 있다. 따라서, 적절한 뒤꿈치 충격하중 형태 결정이 필요하다.

본 연구에서는 이를 위하여, 로드셀을 이용한 뒤꿈치 충격하중 실험을 수행하였다. 실험 방법은 Allen과 Rainer(1975)의 연구 및 Foschi et al(1995)의 연구에서 서술된 바와 같은 방법으로 70kgf의 몸무게를 가진 사람이 5~6cm 높이로 뒤꿈치를 들고 무릎을 편 상태에서 자연스럽게 체중을 뒤꿈치로 옮기며 자유낙하 시키는 방법으로 가력하여 하중의 최대값과 지속시간을 측정하게 된다.

그림 (1)은 로드셀을 통하여 측정된 뒤꿈치 충격하중을 나타낸 것이다. 뒷부분의 하중이 0 이 아닌 일정한 값으로 유지되는 것은 뒤꿈치 충격 후 몸무게의 일부가 전달된 것으로 하중의 지속시간 t_d는 정적하중 기록의 시작 부분까지로 볼 수 있다. 그러므로 뒤꿈치 충격 하중은 바닥 진동해석 시 그림 (2)와 같이 지속 시간 0.08초인 반사인 곡선으로 치환할 수 있다. 그림 (3)은 뒤꿈치 충격하중 최대값의 분포를 나타내는 것으로, 평균은 92.79kgf, 변동계수(COV)는 0.2593이며 정상분포를 따른다.

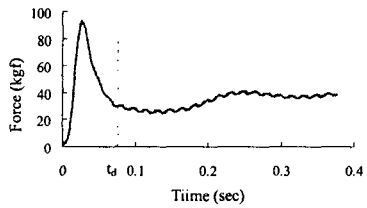


그림 1 뒤꿈치 충격하중 실험 결과

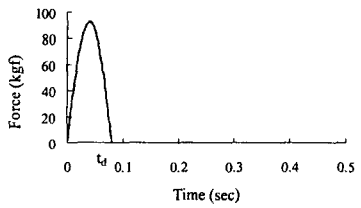


그림 2 바닥 진동해석 입력 하중

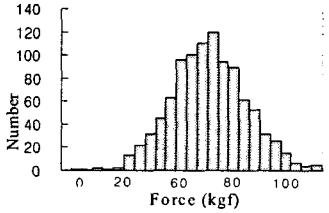


그림 3 뒤꿈치 충격하중 분포

3. 진동해석

본 연구에서는 두께 산정을 위하여 슬래브를 단자유도 시스템으로 치환하여 뒤꿈치 충격하중에 대한 진동해석을 수행하였다. 진동해석 시 감쇠비는 3%, 마감하중은 $230kgf/m^2$, 적재하중은 $200kgf/m^2$을 적용하였다. 다음의 각 변수 조합을 이용하여 슬래브 진동 해석을 수행하고 그 결과를 두께 $l_n/15 \sim l_n/30$ 에 대해 표 1에 정리하였다.

① 바닥 크기 : 4m×4m, 6m×6m, 8m×8m (3개)　　② 두께 : $l_n/10$ ~ $l_n/40$ (6개)

③ 경계 조건 : 사변 고정, 사변 힌지 (2개)　　④ 불확정변수 조합(E_c, P_0) : 1000개

표 1 변수에 따른 해석 결과

경계조건	바닥두께	4m		6m		8m	
		Mean μ (%g)	Coefficient of variation (COV)	Mean μ (%g)	Coefficient of variation (COV)	Mean μ (%g)	Coefficient of variation (COV)
사변힌지	$l_n/15$	0.376	0.197	0.204	0.197	0.133	0.202
	$l_n/20$	0.711	0.200	0.404	0.189	0.274	0.179
	$l_n/25$	1.20	0.195	0.721	0.156	0.512	0.209
	$l_n/30$	1.87	0.193	1.22	0.210	0.728	0.245
사변고정	$l_n/15$	0.233	0.222	0.114	0.202	0.070	0.218
	$l_n/20$	0.397	0.221	0.208	0.206	0.134	0.204
	$l_n/25$	0.627	0.205	0.344	0.194	0.229	0.195
	$l_n/30$	0.930	0.200	0.524	0.198	0.350	0.206

3.2. 신뢰성 평가

36개의 바닥 모델을 1000개의 불확정 변수 조합에 대하여 해석한 결과를 이용하여 뒤꿈치 충격하중에 대한 바닥의 최대 가속도 응답이 0.5%g를 초과할 확률을 산정하였다. 그림 (4)에서 나타난 것과 같이 뒤꿈치 충격에 대한 바닥의 최대 가속도 응답 a_p는 정상분포(Normal Distribution)의 형태를 가지고 있다. 바닥의 최대 가속도 응답이 0.5%g를 초과할 확률은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P(a_p > 0.5\%g) = 1 - P(a_p \le 0.5\%g) = 1 - \Phi(s) \quad (2)$$

$$s = \frac{a_p - \mu_{a_p}}{\sigma_{a_p}}$$

a_p=최대 응답 가속도, t=바닥 두께, $\Phi(s)$=표준정규분포함수

μ_{a_p}=최대 응답가속도의 평균, σ_{a_p}=최대 응답가속도의 표준편차

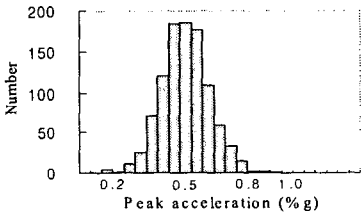
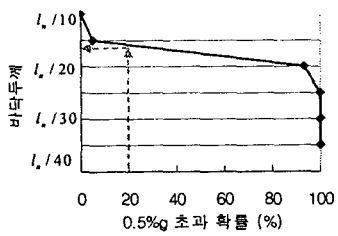
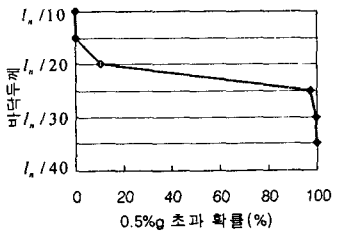


그림 4 최대 가속도 응답 분포
(6m×6m, 4변 고정, $l_n/30$)

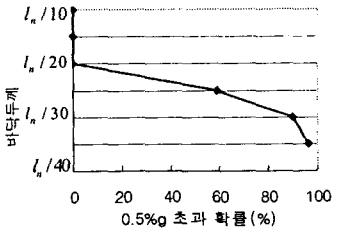
식 (3)에 따라 구한 각 두께별, 크기별, 경계조건에 따라 최대 가속도 응답이 0.5%g를 초과할 확률을 구하였다. 그림 (5)는 각 바닥판들에 대한 두께별로 최대 가속도 응답이 0.5%g를 초과하는 확률을 나타낸 그래프로 두 점 사이를 직선으로 연결하였다. 그림 (5.a)에서와 같이 선형보간 한 직선을 이용하여 임의의 초과확률에 대한 바닥 두께를 구하였다. 뒤꿈치 충격에 대한 바닥의 최대 가속도 응답이 0.5%g를 초과할 확률 10%, 20%, 30%, 40%에 대한 두께를 구하여 표 (2)에 정리하였다.



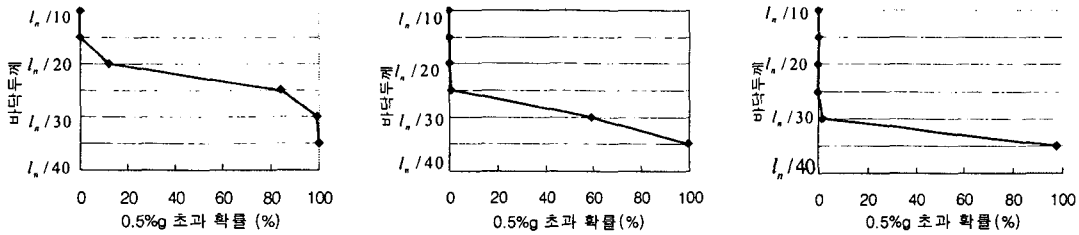
(a) 4m×4m 사변 힌지



(b) 6m×6m 사변 힌지



(c) 8m×8m 사변 힌지



(d) 4m×4m 사변 고정 (e) 6m×6m 사변 고정 (f) 8m×8m 사변 고정

그림 5 임의의 0.5%g 초과 확률에 대한 두께

표 2 0.5%g 초과 확률에 대한 바닥 두께(하중포함)

스팬 길이 / $P(a_p>0.5\%g)$	4m		6m		8m	
	사변 힌지	사변 고정	사변 힌지	사변 고정	사변 힌지	사변 고정
10%	$l_n/15.23$	$l_n/18.93$	$l_n/19.64$	$l_n/25.66$	$l_n/20.70$	$l_n/30.45$
20%	$l_n/15.68$	$l_n/20.45$	$l_n/20.44$	$l_n/26.44$	$l_n/21.46$	$l_n/31.49$
30%	$l_n/16.15$	$l_n/21.05$	$l_n/20.93$	$l_n/27.26$	$l_n/22.27$	$l_n/32.38$
40%	$l_n/16.66$	$l_n/21.69$	$l_n/21.45$	$l_n/28.14$	$l_n/23.14$	$l_n/33.31$

4. 결론

1) 뒤꿈치 충격하중의 분포함수를 결정을 위하여 뒤꿈치 충격하중 실험을 수행하였다. 그 결과 뒤꿈치 충격하중은 정상분포를 따르며 최대값의 평균은 79.1kgf, 변동계수(COV)는 0.17이고 지속 시간은 0.08초 정도이다.

2) 바닥 크기 및 경계 조건과 불확정 변수 콘크리트 탄성계수 및 뒤꿈치 충격하중을 변수로 진동해석과 신뢰성 평가를 수행한 결과 뒤꿈치 충격에 대한 바닥의 최대 가속도값이 0.5%g를 초과할 확률 10%, 20%, 30%, 40%에 대한 바닥 두께는 사변 힌지의 경우 $l_n/15 \sim l_n/24$, 사변 고정의 경우 $l_n/18 \sim l_n/34$ 범위에 있음을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2002년 건설 기술 연구개발 사업으로 연구되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. AISC/ CISC, "Steel Design Guide Series 11. Floor Vibration Due to Human Activity," American Institute of Steel Construction, 1997, Chicago.
2. Choi, B. S., Oh, B. H., Scanlon, A., "Probabilistic Asseeement of ACI 318 Minimum Thickness Requirements for One-Way Members", ACI Structural Journal, Vol. 99, NO. 3, 2002, pp.344~351.
3. 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, June 1976, pp. 165~173.
4. Foschi, R. O., Neumann, G. A., Yao, F., Folz, B., "Floor Vibration Due to Occupants and Reliability-Based Design Guidelines", Canadian J. of Civil Engineering, Vol, 22, pp.471~479.
5. 일본건축학회, 건축물의 진동에 관한 주거성능 평가지침 · 동해설, 1991.