

수직진동 사용성을 고려한 플랫 플레이트 슬래브의 최소두께 제안

Minimum Thickness of Flat Plate Slab Satisfying Floor Vibration Criteria

이 민 정* · 김 동 현** · 한 상 환†

Min Jung Lee, Dong Hyun Kim and Sang Whan Han

(2005년 11월 22일 접수 ; 2006년 5월 23일 심사완료)

Key Words : Flat Plate(플랫 플레이트), Slab Thickness(바닥 두께), Floor Vibration(바닥 진동), Random Variable(불확실 변수), Reliability Analysis(신뢰성 분석)

ABSTRACT

Flat plate slab systems are more economical rather than reinforced concrete frame systems because flat plate slab system reduces story height. Furthermore flat plate systems are more popularly needed in construction practice due to flexibility of plan. Korean Concrete Provisions 2003 provide the minimum thickness of the slab that satisfies serviceability requirement to the static displacement. However, floor thickness in residence buildings may not satisfy the floor vibration criteria although the thickness satisfies the serviceability requirements in current design provisions. This study estimates the dynamic properties of floor vibration for existing flat plate slabs, and proposes the slab thickness satisfying the floor vibration criteria. The dynamic response analysis using finite element method and reliability analysis are carried out for this purpose.

1. 서 론

1.1 연구배경

고강도 재료와 건설기술의 발달은 건축구조물의 고층화·경량화·대공간화를 가능하게 하였고, 경제성과 시공성을 만족하는 새로운 구조시스템에 관한 연구가 끊임없이 진행되고 있다. 최근 플랫 플레이트 구조는 RC 라멘구조에 비하여 층고를 절감할 수 있어 경제적인 면에서 유리하고, 스패의 길이가 길어져 넓은 공간에 유리하다. 더욱이 벽식 구조에서 탈피하여 평면의 변형이 용이하여 적용사례가 증가하고 있다. 그러나 긴 스패길이는 진동평가에 불리하게 작용할 수 있으나, 플랫 플레이트 슬래브의 수직

진동에 대한 연구가 미비한 실정이다.

또한 수직진동에 대한 기준이 마련되어 있지 않으며, 현행 설계 기준인 ACI-318⁽¹⁾과 한국콘크리트 구조 설계기준⁽²⁾에서는 슬래브의 균열, 처짐 및 피로의 영향 등에 대하여 사용성 검토하도록 하고 있다. 특히, 슬래브의 최대 처짐에 대하여는 처짐을 계산하지 않을 경우에 사용해야 하는 플랫플레이트 슬래브의 최소두께를 제시하고 있다.

이 연구에서는 실제 시공 중인 플랫 플레이트 슬래브를 대상으로 진동실험을 수행하여 플랫 플레이트 슬래브의 동특성을 파악하고, 유한요소해석 모델의 타당성을 검토하였다. 이를 바탕으로 유한요소해석과 불확실 변수를 이용한 신뢰성 분석을 수행하여 수직진동에 대한 사용성을 고려한 플랫 플레이트 슬래브의 최소 두께를 제안하고자 한다.

1.2 수직진동 평가기준

이 연구에서는 바닥 수직진동 사용성 기준으로 일

† 책임저자; 정회원, 한양대학교 건축공학부

E-mail : swhan@hanyang.ac.kr

Tel : (02) 2220-0566, Fax : (02) 2291-1716

* 정회원, 한양대학교 대학원 건축공학과

** 한양대학교 대학원 건축공학과

본 건축학회기준을 사용하였다. 일본건축학회 기준⁽³⁾은 ISO2631-2⁽⁴⁾, 마이스터곡선⁽⁵⁾, Allen과 Rainer의 연구에 근거한 CSA기준⁽⁶⁾ 등의 해외 여러 기준을 토대로 최대 가속도 값을 Fig. 1과 같이 5단계로 제한하고 있다. 이 기준은 수직진동에 대한 바닥의 응답파형으로 구한 고유진동수와 감쇠비 등 구조물의 동특성과 최대가속도를 이용하여 진동 사용성 평가를 하도록 하고 있다. 진동평가 곡선의 선택은 Table 1에서와 같이 건물 용도, 진동종류(type), 그리고 사용성 등급(rank)에 따라 정해진다.

이 연구에서는 플랫 플레이트 주거건물을 대상으로 하였으며, 슬래브에 충격하중을 가하여 평가를 수행하므로 Type2와 Type3을 적용된다. 그리고 감쇠비(ξ)에 따라 V-5곡선과 V-10곡선을 선택 사용하였다.

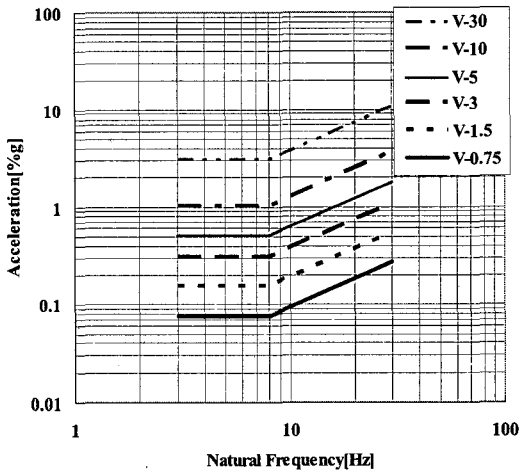


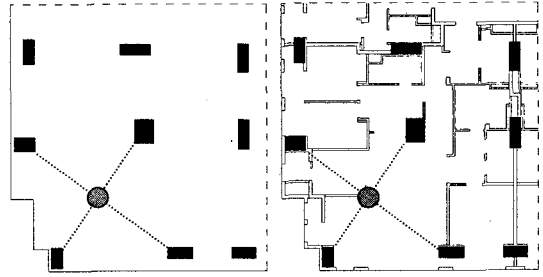
Fig. 1 Vibration criteria curve of AIJ

2. 기존 플랫 플레이트 슬래브의 동특성파악

2.1 실험 대상슬래브 선정 및 실험 방법

플랫 플레이트 슬래브의 동특성을 파악하기 위해, 측정대상 건물을 선정하여 진동 실험을 수행하였다.

● Heel drop location and accelerometer location



(a) FP-1 (b) FP-2
Fig. 2 Subject plan for field test

Table 2 Floor properties of field test subject

Classification	Contents	
Room usage	Livingroom	
Span length (m) (clear span length)	7.7 (6.55)	
Slab thickness (mm)	250	
Concrete strength (MPa)	30	
Height of the story (m)	3.3	
Construction condition	FP-1	Without partition wall
	FP-2	With partition wall

Table 1 AIJ floor vibration criteria

Room	Type Rank usage	Type1			Type2	Type3
		Rank I	Rank II	Rank III	Rank III	Rank III
Residence	Livingroom, bedroom	V-0.75	V-1.5	V-3	V-5	V-10
Office	Reference room	V-1.5	V-3	V-5	V-10	V-30
	Office place	V-3	V-5	V-5	V-10	V-30

Type 1 : floor exposed to continuous or intermittently repeated vibration

Type 2 : floor exposed to impulse vibration and having low damping ratio ($\xi \leq 3\%$)

Type 3 : floor exposed to impulse vibration and having high damping ratio ($3\% < \xi \leq 6\%$)

실험 대상은 플랫 플레이트 슬래브 시스템으로서 테두리보가 없는 외부 모서리 슬래브 중에 스펙일이 가장 긴 슬래브를 대상으로 실험을 실시하였다. 해당 슬래브는 최대 순경간이 6.55m이고 슬래브두께는 250mm로, 이는 현행 설계기준⁽²⁾ $l_n/30$ (=220mm)을 만족하는 슬래브이다.

가력방법은 뒤꿈치 충격으로 수행하였으며, Fig. 2에서와 같이 슬래브 중앙에서 10회씩 실시하였다. 구조체 상태(FP-1)와 칸막이벽 설치 후(FP-2) 두 가지 경우에 대해 동특성을 비교하였는데, 두 경우 모두 일부 설비 마감이 되어있는 상태였다. 측정 대상 슬래브의 물리적 특성을 Table 2에 정리하였다.

2.2 측정결과

뒤꿈치 충격을 이용한 진동 실험 결과, Fig. 3과 같은 응답을 얻었다. 이와 같은 가속도응답 결과를 이용하여 슬래브의 동특성 및 최대가속도값을 구하

였다. 최대가속도는 10회 측정된 평균값이고, 감쇠비(ξ)는 다음 식(1)로 계산할 수 있다. 이 연구에서는 $i=1, j=10$ 으로 하여 초기 10개 진폭에 대한 평균값으로 구하였다.

$$\xi = \frac{1}{2\pi j} \ln \frac{A_j}{A_{i+j}} \quad (1)$$

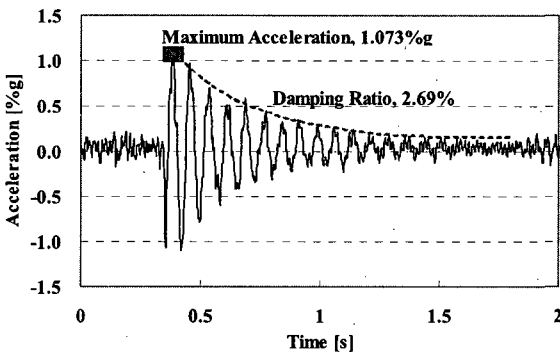
여기서,

A_j : 뒤꿈치 충격하중 응답의 i 번째 진폭

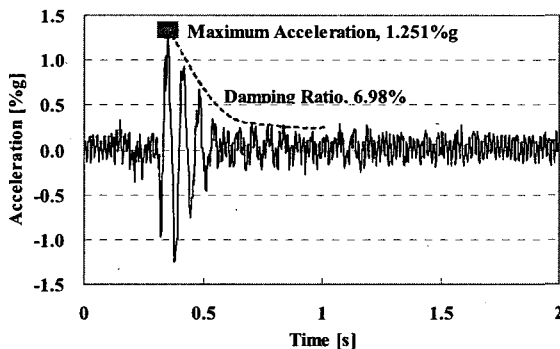
A_{i+j} : 뒤꿈치 충격하중 응답의 $i+j$ 번째 진폭

고유진동수는 Fig. 3과 같은 시간이력 응답함수를 FFT 변환하여 진동수 영역으로 나타낸 후, 지배진동수를 구조물의 고유진동수로 하였다. FFT 변환과 식 (1)의 결과를 이용하여 얻은 동특성과 최대 응답가속도의 평균값을 Table 3과 Fig. 4에 정리하였다.

Table 3과 Fig. 4에서 FP-1과 FP-2의 측정값과 평가 기준을 비교하여 볼 때, 칸막이벽은 최대가속도와 고유진동수로 평가되는 슬래브의 수직진동 성능에는 큰 영향을 미치지 않는다. 그러나 감쇠비가 크게 증가하게 되는데, 일본건축학회기준에



(a) Floor response for heel drop (FP-1)



(b) Floor response for heel drop (FP-2)

Table 3 Mean values of measured results

Subject	Dynamic properties	Maximum acceleration (%g)	Natural frequency (Hz)	Damping ratio (%)
FP-1		1.073	13.196	2.69
FP-2		1.251	16.611	6.98

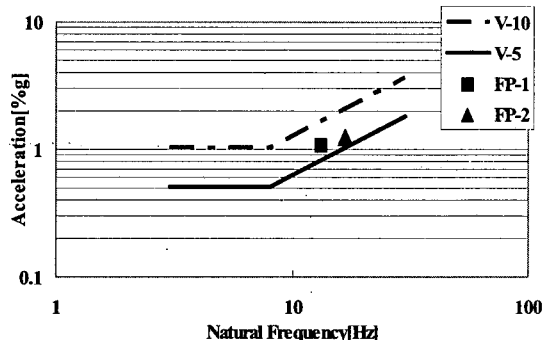


Fig. 4 Comparison with measured results and vibration criteria

서는 감쇠비가 3%를 초과할 때, 사용성 평가기준을 V-5곡선에서 V-10곡선으로 완화하여 적용하도록 하고 있다. 따라서 FP-1슬래브는 3%미만의 감쇠비로 V-5곡선에 만족하지 못하였으나, 칸막이벽이 설치된 FP-2 슬래브는 감쇠비가 3%를 초과하여 V-10곡선에 대하여 만족하게 되었다. 충격하중으로 인한 바닥진동에 대하여 칸막이벽의 설치는 감쇠비를 증가시켜 가속도 제한값을 높일 수 있다.

3. 유한요소 해석모델의 타당성 검토

플랫 플레이트 슬래브를 대상으로 한 진동실험 결과에서 칸막이벽은 응답가속도와 고유진동수에 기여하기보다 감쇠비에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

따라서 이 연구에서는 골조상태의 플랫 플레이트 슬래브를 대상으로 유한요소해석을 수행하여 수직진동 사용성을 고려한 두께제안을 하고자 하며, 칸막이벽이 설치되는 경우는 감쇠비 3%이상에 대한 가속도 제한값을 적용함으로써 제안하였다.

유한요소해석은 MIDAS Genw을 사용하였으며, 바닥 모델에 사용된 요소는 판 요소이다. 바닥 모델은 FP-1슬래브를 대상으로 측정된 동특성과 최대가속도를 해석결과와 비교하여 검증하였다. Table 4에서는 측정결과와 유한요소해석 결과의 최대가속도 값과 고유진동수 값을 나타내었는데, 최대가속도 값과 고유진동수 값이 10%내에서 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이것으로 해석모델에 골조상태에서의 실제 슬래브의 동특성이 유사하게 반영되었다고 볼 수 있다. 따라서 이와 같은 유한요소 모델을 이용하여 수직진동에 대한 플랫 플레이트 슬래브 두께를 제안하고자 한다.

Table 4 Comparison with measured results and analysis results

		Maximum acceleration (%g)	Natural frequency (Hz)
FP-1	Measured results, ①	1.073	13.196
	Analysis results, ②	1.139	13.184
Error (%), ②-① /①×100		5.78	0.076

4. 수직진동 사용성을 고려한 플랫 플레이트 슬래브의 최소 두께 제안

4.1 플랫 플레이트 슬래브 선정

동일한 슬래브 두께를 가진 다 경간의 플랫 플레이트 슬래브에 대하여 경계조건에 따라 해석을 수행한 결과, 모서리슬래브가 휨 강성이 가장 작게 나왔다. 따라서 모서리 슬래브가 진동에 대해 가장 불리한 슬래브로서 최소 두께를 결정한다. 그리고 현행 설계기준⁽²⁾에 있어서도 테두리보가 없는 경우 모서리 슬래브가 가장 두꺼운 두께로 설계된다.

이 연구에서는 수직진동 사용성을 고려한 두께 검토를 위하여 Fig. 5에 나타난 바와 같이 테두리 보가 없는 3경간의 정방형 플랫 플레이트에 대하여 모서리부분 슬래브의 중앙점에서 뒤꿈치 충격하중을 가력하고, 그 가력점의 응답을 이용하고자 한다.

4.2 슬래브 모델에 대한 변수선정

플랫 플레이트 슬래브의 두께제안을 위하여 진동 해석 모델은 다음과 같이 결정하였다. 스패ん 길이는 현재 시공되어지는 플랫 플레이트 슬래브의 적정 길이를 포함할 수 있는 6m, 8m를 대상으로 하였으며, 각 스패ん의 최소두께는 콘크리트구조설계기준⁽²⁾에서 제시하고 있는 플랫 플레이트의 최소두께기준 (Table 5)을 고려하여 $l_n/33$ 부터 20mm 간격으로 증가시키어 8개씩의 변수로 선정하였다. 감쇠비는 플랫 플레이트 건물의 실험결과 ($\xi=2.69\%$)를 바탕으로 천장 및 일부 설비 마감된 골조상태로 가정하여 3%를 사용하였다.

플랫 플레이트 슬래브의 적정 스패ん길이 6m, 8m의 정방형 슬래브에 대하여 임의의 두께 240mm의 동일한 슬래브두께를 갖는 3경간 구조물에 콘크리트 강도를 21, 24, 27, 30 MPa로 변화시켜 그 동특성

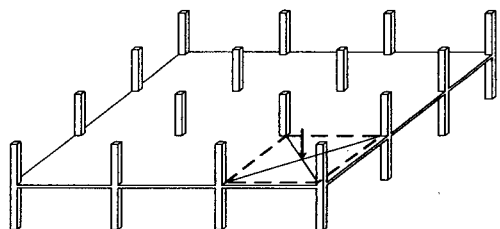


Fig. 5 Prototype of flat plate without edge beam

Table 5 Minimum thickness of slabs without interior beam (Korean Concrete Provisions, 2003)

Yield strength f_y (MPa)	Without drop panels		
	Exterior panels		Interior panels
	Without edge beams	With edge beams	
400	$l_n/30$	$l_n/33$	$l_n/33$

Table 6 Analysis results (span length 6 m)

Span length (m)	Slab thickness (mm)	Concrete strength (MPa)	Maximum acceleration (%g)	Natural frequency (Hz)
6	240	21	1.429	13.67
		24	1.396	14.65
		27	1.356	14.65
		30	1.315	14.65
		35	1.290	15.63

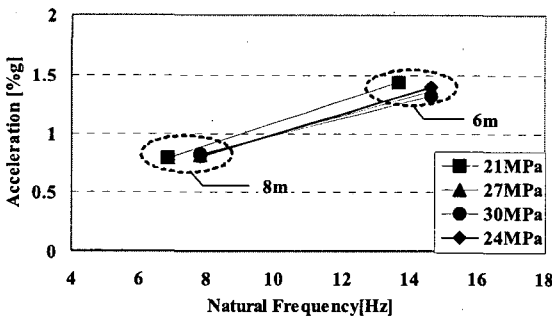


Fig. 6 Vibration analysis results according to concrete strength

Table 7 Representative slab model

Analysis parameters		Contents
Concrete strength (MPa)		30
Damping ratio (%)		3
Bays		3×3
Span length (m)		6, 8
Slab thickness (mm)	Span length 6 m	180, 200, 220, 240, 260, 280, 300, 320
	Span length 8 m	240, 260, 280, 300, 320, 340, 360, 380

을 알아본 결과 Table 6(span length 6 m)과 같은 값을 얻을 수 있었으며, 구한 동특성 값을 일본건축학회 기준에 비교해 본 결과, Fig. 6에서 보이는 바와 같이 콘크리트 강도에 의한 동특성 변화가 미비함을 확인할 수 있었다. 따라서 현재 플랫 플레이트 슬래브에 가장 많이 쓰이는 콘크리트강도 30 MPa만을 대상으로 해석 수행하였다. 위의 내용을 바탕으로 플랫 플레이트 슬래브 모델의 변수를 정리하면 Table 7과 같다.

4.3 슬래브 모델에 대한 불확실 변수선정

콘크리트는 시멘트, 골재, 물의 혼합체로서 교반 및 운반, 시공 등의 여러 환경적 요인으로 매우 불규칙한 압축강도가 측정된다. 이런 불확실한 압축강도는 재료의 탄성계수에도 영향을 준다. 따라서 콘크리트 강도와 탄성계수를 불확실 변수로 선정하였다. 또한 뒤꿈치 충격하중도 불규칙한 힘과 주기로 가려되므로 뒤꿈치 충격하중의 최대값과 지속시간을 불확실 변수로 선정하였다.

(1) 불확실 변수의 통계적 특성

콘크리트 압축강도와 탄성계수에 대한 통계적 특성은 Choi와 Scanlon의 연구⁽⁷⁾에서 제시한 값을 사용하였다. 뒤꿈치 충격하중은 Lenzen과 Murray⁽⁸⁾의 연구와 일본건축학회기준⁽³⁾에서 각각 다른 형태의 하중을 제시하고 있다. Lenzen과 Murray는 하중의 최대값과 지속시간을 3000 N, 0.05 sec로, 일본

Table 8 Probability model of random variables

Variables	Distribution	Mean values	COV†
Concrete strength (f_{ck} , MPa)	Normal	$0.675 f_{ck} + 7.58 \geq 1.15 f_{ck}$	0.176
Elastic Young's modulus (E_c , MPa)	Normal	$1.06 \times 15000 \sqrt{f_{ck}}$, $f_{ck} \leq 30 \text{ MPa}$ $1.06 \times (10500 \sqrt{f_{ck} + 7.58})$, $f_{ck} > 30 \text{ MPa}$	0.119
Heel drop force (P , kN)	Normal	1013.9	0.215
Heel drop duration (T_d , sec)	Log-normal	0.0652	0.314

† Coefficient of variation

건축학회 기준에서는 700 N, 0.04 sec로 두 하중함수 형태의 차이가 크게 나타나고 있다. 따라서 이 연구에서는 선행연구(Lee. et al., 2004)⁽⁹⁾에서 제시한 뒤꿈치 충격하중의 하중함수를 사용하였다. 선행연구에서는 뒤꿈치 충격실험(10명이 20회씩)을 수행하여 하중의 크기는 1.03 kN, 지속시간은 0.065 sec로 하중함수의 통계적 특성을 정의하였다. 위에서 결정한 불확실 변수들의 통계적 특성을 정리하면 Table 8과 같다.

(2) 불확실 변수들의 난수생성 및 진동해석

슬래브의 불확실성을 고려한 신뢰성 분석을 위하여 mMonte Carlo simulation⁽¹⁰⁾을 수행하였다. 이를 위하여 각각의 불확실 변수에 대한 난수(random number)를 1,000개씩 생성하여 해석모델변수 12개에 대하여 모두 12,000회 해석을 수행하였다. 그 결과 Table 9와 같이 최대가속도와 고유진동수를 구하였다.

4.4 신뢰성분석

(1) 기준 초과확률 계산

진동해석을 통하여 산출된 슬래브모델의 최대가속

Table 9 Summary of vibration analysis results

Span length (m)	Slab thickness (mm)	Maximum acceleration (%g)	Natural frequency (Hz)
6	180	1.814	10.385
	200	1.565	11.487
	220	1.333	12.661
	240	1.126	13.578
	260	0.945	14.495
	280	0.792	15.462
	300	0.664	16.346
	320	0.564	17.163
8	240	0.750	7.187
	260	0.706	7.736
	280	0.662	8.209
	300	0.617	8.786
	320	0.576	9.193
	340	0.539	9.670
	360	0.499	10.060
	380	0.463	10.520

도와 고유진동수의 평균값을 일본건축학회 기준⁽³⁾과 비교하여 신뢰성 분석을 실시하였다. 기준에 대한 초과확률은 식 (2)을 이용하여 계산한다.

$$P_{EXCESS} = P(A_P > A_{ALL}) \tag{2}$$

여기서,

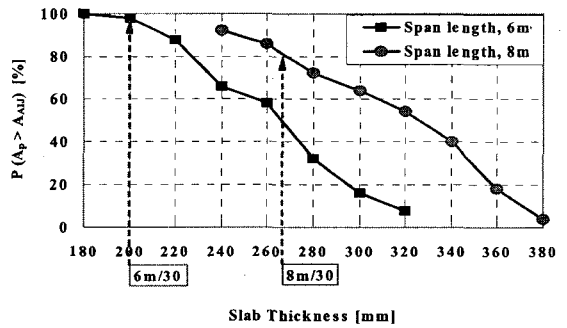
P_{EXCESS} : 기준 초과확률

A_P : 최대응답가속도

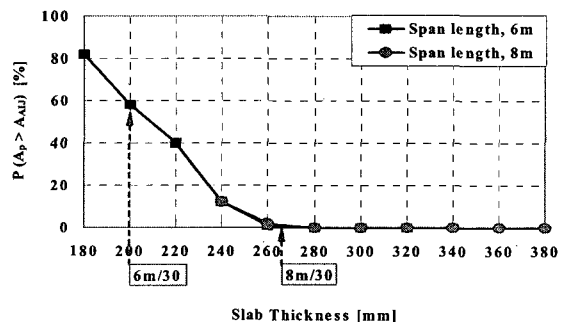
A_{ALL} : 일본건축학회 기준의 제한 값

식 (2)에서 기준값(A_{ALL})은 칸막이벽이 없는 구조체 상태에 대하여 V-5곡선($\xi \leq 3\%$)을 사용하였고, 칸막이벽이 감쇠비를 증가시키는 경우를 고려하여 V-10곡선($\xi > 3\%$)을 사용하였다.

Fig. 7은 진동 사용성 평가기준 V-5곡선과 V-10에 대해 6m, 8m스팬의 플랫 플레이트 슬래브의 두께에 따른 초과확률을 나타낸 것이다. 또한 그래프에 현행 설계기준에 의해 설계되었을 경우에



(a) Exceedancy probability for V-5 curve



(b) Exceedancy probability for V-10 curve

Fig. 7 Exceedancy probability for A_{ALL}

Table 10 The proposed minimum thickness of flat plate slab

Damping ratio $\leq 3\%$			Damping ratio $> 3\%$		
Span length (m)	Exceedancy probability for V-5(%)	Minimum slab Thk.	Span length (m)	Exceedancy probability for V-10(%)	Minimum slab Thk.
6	5	$l_n/18.3$	6	1	$l_n/23.2$
	10	$l_n/19.1$		5	$l_n/23.8$
	20	$l_n/20.3$		10	$l_n/24.7$
	30	$l_n/21.2$		20	$l_n/25.6$
	40	$l_n/21.9$		30	$l_n/26.4$
8	5	$l_n/21.1$	8	1	$l_n/29.6$
	10	$l_n/21.5$		5	$l_n/30^*$
	20	$l_n/22.3$		10	$l_n/30^*$
	30	$l_n/22.9$		20	$l_n/30^*$
	40	$l_n/23.5$		30	$l_n/30^*$
			40	$l_n/30^*$	

진동사용성 평가기준에 대한 초과확률을 화살표로 표시하였다.

(2) 초과확률에 대한 슬래브두께 제안

Fig. 9를 이용하여, V-5곡선과 V-10곡선의 기준 값에 대하여 초과확률에 따른 슬래브두께를 Table 10과 같이 제안하였다. 제안된 값은 현행 콘크리트 구조설계 기준에서 처짐에 대한 최소두께보다 작을 수 없으므로, Table 10에 수직진동 사용성 기준초과확률에 따른 두께가 현행 설계기준의 최소두께보다 적을 경우 * 표시를 하였다. 이 경우에는 현행 기준의 최소두께 값인 $l_n/30$ 을 사용한다.

5. 결 론

이 연구에서는 플랫 플레이트 슬래브의 동특성을 파악하고 일본건축학회 기준⁽³⁾의 제한 값과 비교하였다. 또한 유한요소해석과 Monte Carlo simulation을 이용하여 각 기준값(V-5, V-10)에 대한 기준초과확률을 구하여 각 초과확률에 대한 플랫 플레이트 슬래브의 두께를 제안하였다.

(1) 기존 플랫 플레이트 슬래브 구조물의 진동실험을 통하여 동특성을 알아 본 결과, FP-1슬래브의

최대가속도는 1.073 %g 였고, 고유진동수는 13 Hz, 감쇠비는 2.69 %로 V-5기준을 만족하지 못하였다. 그러나 FP-2슬래브의 최대가속도는 1.251 %g였고, 고유진동수는 17 Hz, 감쇠비는 6.98 %로 감쇠비의 증대로 인하여 V-10기준에 대해 만족하는 결과를 얻었다.

(2) 유한요소 해석과 신뢰성 분석을 사용하여 얻은 6m스팬에 대하여 진동 사용성 최소두께는 감쇠비 3%이하 일 경우에는 $l_n/18.3 \sim l_n/21.9$ 로 현행 설계기준($l_n/30$)에 비하여 두꺼운 슬래브 두께를 요구하고 있으며, 8m스팬에 대해서도 현행 설계기준에 비하여 $l_n/21.1 \sim l_n/23.5$ 로 두꺼운 두께를 요구하고 있다.

그러나 감쇠비가 3%를 초과할 경우에는 8m스팬에 대한 진동 사용성을 고려한 최소두께가 현행 최소두께기준보다 작아지게 되므로, 이때는 현행 설계기준의 최소두께 제한 값을 적용한다.

후 기

이 연구는 과학재단 특정기초연구지원 사업 R01-2006-000-10722-0과 과학기술부 ERC 과제 R11-2005-056-04002-0에 따른 연구지원으

로 수행된 것으로 이에 감사를 표한다.

참 고 문 헌

(1) American Concrete Institute, 2002, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, pp.114~116.

(2) Korea Concrete Institute, 2003, Design Code for Structural Concrete and Commentary, pp. 83~85.

(3) Architectural Institute of Japan, 1991, Guidelines for the Evaluation of Habitability to Building Vibration, pp.1~10.

(4) International Organization For Standardization, 1989, Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration Part 2: Continuous and Shock-induced Vibration in Buildings, pp.1~11.

(5) Lenzen. K. H., 1966, "Vibration of Steel Joist Concrete Slab Floors," Engineering Journal, Vol. 3, No. 3, pp.133~136.

(6) Allen, D. E. and Rainer, J. H., 1976, "Vibration Criteria for Long-span Floors," Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 3, No. 2, National Research Council of Canada, pp.165~173.

(7) Choi, B. S., Oh, B. H. and Scanlon, A., 2002, "Probabilistic Assessment of ACI 318 Minimum Thickness Requirements for One-way Members," ACI Structural Journal, Vol. 99, No. 3, pp. 344~351.

(8) Lenzen, K. H. and Murray, T. M., 1969, "Vibration of Steel Beam Concrete Slab Floor Systems," Dept. of Civil Engineering, University of Kansas, Lawrence, Kans., Report No. 29.

(9) Lee, M. J., Han, S. W. and Nam, S. W., 2005, "Probability Based Determination of Slab Thickness Satisfying Floor Vibration Criteria," Journal of the Korea Concrete Institute, Vol.17, No. 5, pp. 687~694.

(10) Ang A. H-S. and Tang W. H., 1975, Probability Concepts in Engineering Planning and Design-decision, Risk, and Reliability, Vol. I, II, Wiley, pp. 247~332.

(11) Han, S. W. and Lee, S. W., 2003, "Investigation on Human Perception Level under Walking and Heel Drop Vibration Using Shaking Table Test," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 13, No. 3, pp. 186~193.