

프리플렉스 합성보를 적용한 기존 건물 바닥구조의 진동평가

Vibration evaluation of building floors using Preflex composite beams

°경재환* 임지훈* 김희철**
Jae-Hwan Kyung Ji-Hoon Lim Hee-Cheul Kim

Key Word : natural frequency(고유진동수), preflex composite beams(프리플렉스 합성보), floor vibration(바닥진동)

abstract

The dynamic characteristic of the building using preflex composite beams is a low natural frequency due to long span. Therefore, both vibrational acceleration and the characteristic of natural frequency damage to people using the building. This study estimates a vibrational acceleration based on walking and natural frequency in five kinds of building. Recently, using methods of evaluating a serviceability are based on JIA, AISC, Eurocode, CSA, DIN and ISO. ect. The result of this study is content with foreign regulations and serviceability. However, considering of these results, the method of evaluating serviceability should be developed in the future.

1. 서론

최근 국내에서는 교량에 사용되는 프리플렉스 합성보를 장스팬이 요구되는 사무실, 스포츠 센터 및 공항시설과 같은 건축구조물에 적용함에 따라 다른 구조 시스템에 비해 경제적이며 공간 활용에 있어서도 큰 이점을 가지고 있다. 그러나 장스팬이 요구되는 구조물에 적용함에 따라 상대적으로 강성의 감소와 경량화에 따른 진동과 같은 동적거동에 대해 민감하게 반응하게 되는 문제점을 안고

있다. 건물의 바닥은 보행하중이나 임의의 작용하중에 대해서 항상 진동하고 있다. 하지만 대부분의 경우 이러한 진동은 미약하여 거주자가 느끼지 못하나. 장스팬이나 강성이 낮은 경우에는 진동량이 커져서 거주자의 심리적인 불쾌감이나 불안감을 일으켜 건물의 사용성에 영향을 미칠 수 있다.

이러한 바닥진동에 대해 각국에서는 진동에 대하여 진동평가기준 또는 설계지침을 규정하고 있으며, 진동문제가 우려되는 바닥구조에 대해 기준을 제정하여 진동수준을 평가하고 있다. 이러한 평가의 기준은 해외의 경우 일본건축학회기준, ISO, AISC, Eurocode, CSA, DIN 등에서 바닥구조의 진동에 대하여 비교적 상세하게 내용을 다루고 있으

* 경희대학교 토목·건축공학부 건축구조전공

** 정희원, 경희대학교 토목·건축공학부

며, 국내에서는 최근 들어 강구조 한계상태 설계법에서 바닥진동에 대한 내용을 다루고 있다.

바닥구조의 진동평가는 고유진동수와 가속도 또는 진폭 등의 실측을 통해 이루어지기도 하나 신축건물에 대해서는 각 국에서 제시하고 있는 예측식을 통해 평가가 이루어지고 있다.

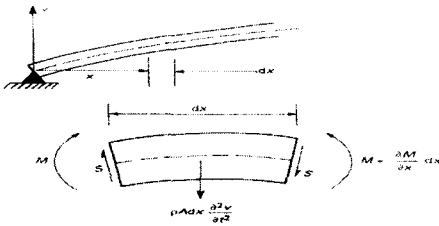
이러한 고유진동수 예측식에는 보요소나 슬래브 요소에 대한 동역학적 진동이론으로부터 유도된 보진동식과 슬래브 진동식이 있으나 현장조건(재료, 시공조건등)에 따라 실제 구조물의 고유진동수와 상이한 결과를 나타낼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 실측을 통한 프리플렉스 합성보를 적용한 바닥구조의 진동평가를 Eurocode, 일본건축학회에서 제시하는 진동구조 기준 및 진동장해기준을 중심으로 바닥구조의 진동평가를 실시하기로 한다.

2. 운동방정식

2.1 보의 운동방정식

등분포 하중을 받고, 보의 단면이 일정한 연속체 단순보의 진동에 대한 운동방정식은 다음과 같은 과정으로 유도된다.

$$Sdx = M - (M + \frac{\partial M}{\partial x} dx) = 0 \quad \text{<식 1>}$$



<그림 1> 단순보 진동의 자유물체도

위치와 시간의 함수인 변위 v 는 조화함수이므로 <식 2>과 같이 정의될 수 있다.

$$v(x, t) = V(x)\sin(\omega t + a) \quad \text{<식 2>}$$

단순보에서, 두 지점의 변위와 모멘트가 0이라는 경계조건을 정리하면 <식 3>과 같다.

$$\begin{aligned} x=0, \quad V=0, \quad \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} &= 0 \\ x=l, \quad V=0, \quad \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} &= 0 \end{aligned} \quad \text{<식 3>}$$

따라서, 단순보의 고유진동수는 <식 4>과 같이 정리된다.

$$f_n = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{n^2 \pi}{2 l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad \text{<식 4>}$$

2.2 슬래브의 운동방정식

<그림 2(a)>와 같은 슬래브에 <그림 2(b)>와 같은 등분포 동적하중이 슬래브 면과 직교방향으로 작용하고 있다. 장방향 슬래브의 각 변 길이는 a와 b이고 슬래브의 두께는 h이며, h는 변의 길이에 비해 상대적으로 미소한 것으로 가정하고, 감쇠와 전단과 회전강성의 효과는 무시한다.

슬래브진동의 자유물체도는 <그림 2(c)>와 같으며 V_x 와 V_y 는 각각 y축과 x축에 평행한 단위 길이당 전단력에 해당하며, M_x 와 M_y 는 모멘트이고, M_{xy} 는 비틀림모멘트이며, ρ 는 슬래브의 체적 밀도이다.

<그림 2(c)>에서 보여진 얇은 슬래브요소에서 z 방향의 모든 힘의 합하면 <식 5>과 같다.

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + q(x, y, t) + \rho y h \ddot{w} = 0 \quad \text{<식 5>}$$

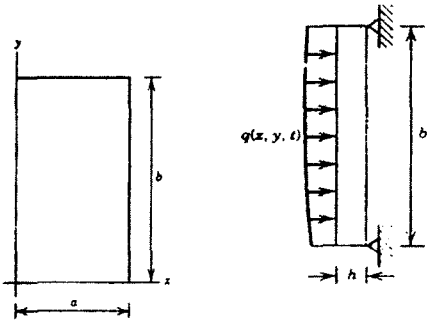
사변이 단순지지된 슬래브의 진동에서, 자유진동에 대하여 아래의 <식 6>로 표시할 수 있다.

$$w = (x, y, t) = X(x)Y(y)g(t) \quad \text{<식 6>}$$

따라서 연속체 슬래브의 각 차수에 대한 고유진동수는 <식 7>과 같고 슬래브요소에서 1차 고

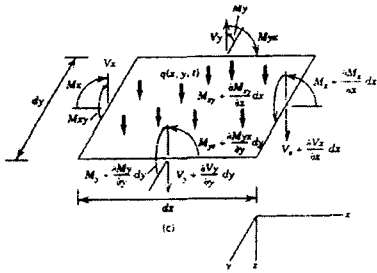
유진동수는 $n=1, p=1$ 에 해당된다.

$$f = \frac{w}{2\pi} = \frac{\pi}{2} \left(\frac{n^2}{a^2} + \frac{p^2}{b^2} \right) \sqrt{\frac{D}{\rho h}} \quad \text{<식 7>}$$



(a) 슬래브 평면

(b) 슬래브에 작용하는 동적하중



(c) 얇은 슬래브요소 진동의 자유물체도
<그림 2> 얇은 슬래브요소의 진동

3. 고유진동수에 따른 진동평가기준

3.1 Eurocode 3

CEN EC 3/1에서는 바닥구조의 상하진동에 대한 제한값을 다음과 같이 규정하고 있다.

<표 1> 바닥판 진동의 제한값

구분	최소 고유진동수 f_0 (Hz)	한계변형의 합계 δ (mm)
보행	3	28
리듬운동	5	10

<표 1>에서의 고유진동수는 다음의 <식 8>에 의하여 산출한다.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{a}{L^2} \sqrt{\frac{E_s I}{m}} \quad \text{<식 8>}$$

f_0 : 고유진동수 (Hz)

E_s : 탄성계수 (t/m^2)

I : 단면 2차모멘트 (m^4)

L : 스패 (m)

m : 단위길이당 질량 ($t/m \cdot sec^2$)

a : 기본진동모드의 진동수 계수

계수 a 에 대한 정의는 단순지지보의 경우 9.869, 양단고정보는 22.37, 캔틸레버보는 3.516, 그리고 한단고정·타단틀러보의 경우 15.418을 사용한다.

3.2 일본건축학회에 의한 방법

처짐 (최대 진폭의 1/2)은 물체를 높이 h 에서 보에 자유 낙하시킬 때 충격에 의하여 산출한다. 일본건축학회에서 발간된 「합성보 구조설계시공지침」에 의하면 1인 보행시의 진동은 약 3kg의 물체를 5cm의 높이에서, 2인 보행시 약 6kg의 물체를 동일높이에서 낙하시킨 값과 같은 것으로 정의되어 있다. 반진폭의 계산은 <식 9>와 같으며 진동수의 산정은 <식 10>에 따른다. 진동의 평가는 <식 9>에서 얻은 값을 <그림 3>의 마에스터 곡선에 대입하여 구한다.

$$\delta_d = \delta_{st} + \sqrt{\delta_{st}^2 + \frac{2h \delta_{st}}{1 + \frac{(17-4a)W}{35W_1}}} \quad \text{<식 9>}$$

W_1 : 낙하물체의 중량 (kg)

W : 보의 전 하중 (kg)

δ_d : 충격에 의한 처짐 (최대 진폭의 1/2) (cm)

δ_{st} : 하중 W_1 이 보 중앙에 집중하중으로 작용할 때의 보의 최대 처짐 (cm)

$$\delta_{st} = \delta_{st} - \alpha(\delta_{st} - \delta_{st}) = \delta_{st}(1 - \frac{3}{4}\alpha)$$

$$\delta_{st} = \frac{W_1 l^3}{48 E_s I_g} : \text{양단 단순지지인 경우}$$

$$\delta_{st} = \frac{W_1 l^3}{192 E_s I_g} = \frac{1}{4} \delta_{st} : \text{양단 고정인 경우}$$

E_s : 강재의 탄성계수 (kg/cm^2)

I_g : 프리플렉스 합성보의 환산 단면 2차 모멘트 (cm^4)

l : 보의 스패 (cm)

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{\lambda^2 n l^2}{l^2} \sqrt{\frac{E_s I_g g}{\omega}} \quad \text{<식 10>}$$

$$\lambda_{nl} = \pi + (4.730 - \pi)\alpha$$

α : 보 단부의 고정도

(단순보 : $\alpha = 0$, 양단고정보 : $\alpha = 0.8$)

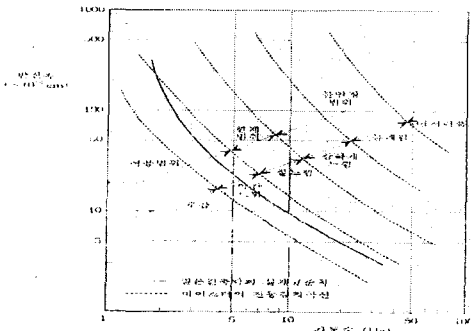
f_0 : 고유진동수 (Hz)

l : 보의 스패 (m)

I_g : 프리플렉스 합성보의 단면2차모멘트 (m^4)

ω : 단위길이당 전 하중 (t/m)

g : 중력가속도 (9.8m/sec^2)



<그림 3> 마이스터 곡선의 진동감각곡선

4. 진동가속도에 의한 평가기준

4.1 허용 진동기준

일반적으로 구조물을 통해 전달되는 진동을 사람이 느끼게 되는 것에는 두 종류가 있다. 첫째, 몸을 지지하고 있는 표면 전체를 통해 인간의 신체에 전달되는 진동과 두 번째로는 건물 내의 거주자가 보이는 반응이다. 이러한 진동으로 인한 거주자들이 공포 또는 수면 등에 방해를 받는다. 과거에는 군사적인 목적이나 비행기 등에 대하여 사람들의 피로도를 측정했으나 현재에는 사람들에게 약간의 피해까지도 연구를 시작했으며, 이에 대한 몇 가지 기준을 제시하였다.

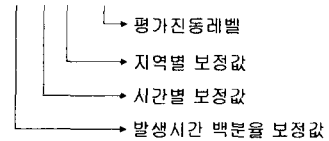
4.2 진동 가속도레벨

진동 가속도레벨 L_a 는 <식 11>에 의해 산출된다.

$$L_a = 20 \log_{10} \frac{A}{A_0} \text{ (dB)} \quad \text{<식 11>}$$

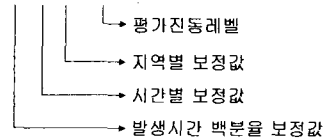
위 식에서 구한 값은 다음과 같이 보정을 거쳐 판단된다.

낮의 경우 : $L - 5 + 0 - 5 < 60$



즉, 실측값이 70 dB(V) 이하여야 한다.

밤의 경우 : $L - 5 + 5 - 5 < 60$



즉, 실측값이 65 dB(V) 이하여야 한다.

위 식에서, A 는 진동가속도 실효값 (m/sec^2)이며, A_0 는 기준값으로서 $10^{-5} m/sec^2$ (유럽에서는 $10^{-6} m/sec^2$)을 사용한다. 진동가속도 레벨이 60~80 dB 이면 공해진동의 대상이 된다.

4.3 국내기준

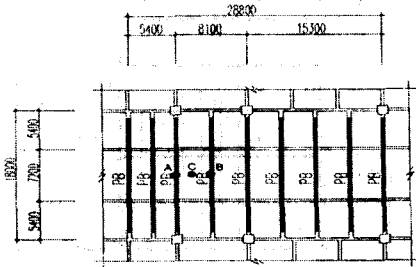
국내의 진동기준은 생활환경기준 및 건강보호의 목적으로 <표 2>의 배출허용 기준을 적용하고 있다. 생활진동 규제법 시행규칙에 따르면 97.10.22 이후부터는 이전에 적용하였던 생활진동 규제규준이 단순화되면서 각 지역 및 시간에 따라서 진동허용기준을 설정하고 있다. 또한 연속진동이 일어나는 시간에 따라 보정치를 두고 있다. 예를 들어, 일반 주거지역에서의 진동레벨 실측값을 LdB(V) 라하고, 낮과 밤의 배출허용값을 각각 65dB과 허용값을 규정하고 이러한 진동이 공사장에서 발생된다면 연속진동이 2-4시간일 경우 보정치를 5dB로 하고, 2시간 이하일 경우 10dB로 한다.

<표 2> 생활진동 규제기준 (97.10.22 ~ 현재)

대상지역	시간별	주 간	심 야
		(06:00 - 22:00)	(22:00 - 06:00)
주거지역, 녹지지역, 준도시지역 중 취락지구 및 운동·휴양지구, 자연환경보전지역, 기타 지역안에 소재한 학교·병원·공공도서관		65 이하	60 이하
기타 지역		70 이하	65 이하

5. 측정대상 건물

시공오차 및 측정에 대한 오차를 감안하여 프리플렉스 합성보를 사용한 건물 5개를 선정하여 측정을 수행하였다. <그림 4>는 측정 대상 건물의 평면을 보여주고 있다.



<그림 4> K교회의 구조 평면도

<표 3>은 각 건물별 프리플렉스 합성보의 종류를 표시하였다.

<표 3> 건물별 프리플렉스 보의 종류

대상건물	장제 (cm)	슬래브 (cm)	하부 Con'c (cm)	보 스펀 (cm)
K사옥	81×30×1.5×1.8	405×10.5	50×20	1620
G공항	59.6×45×1.5×2.2	780×13.5	90×30	1800
P오피스텔	54×30×1.2×2.5	270×15	65×20	1620
K교회	66×35×1.5×2.5	405×13.5	55×20	1800
J교회	68×45×1.5×3.8	270×12	75×25	2160

6. 측정

6.1 측정방법

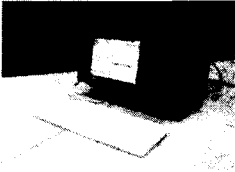
본 연구에서 요구되어지는 측정값은 일정한 가진에 의한 가속도 측정값과 각 부재들의 1차 진동수 (고유진동수)를 측정하는 것으로 한다. 가진방법의 선정은 일본건축학회 「합성보 구조설계 지침」에서 제안하고 있는 방법을 적용하였다.

6.2 측정장비

본 진동의 측정에 사용된 장비의 목록 및 형태는 <표 4>, <그림 5>과 <그림 6>와 같다.

<표 4> 측정 장비 목록

장비명	제조사	제품명	특성
주파수 분석기	Scientific Atlanta	SA390	채널수 : 4 Ch
진동 센서	DYTRAN	3191A	5110mV/g
충격하중		모래 주머니	3kg, 6kg



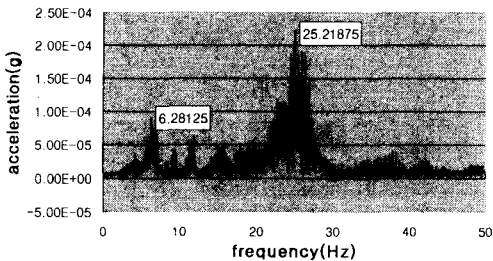
<그림 5> 주파수 분석기 (SA390)



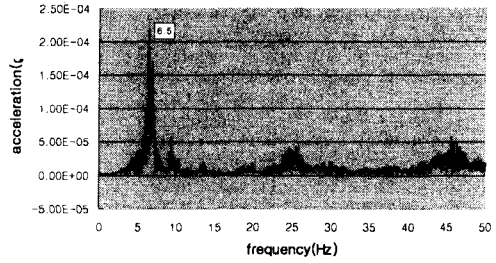
<그림 6> 가속도계 (DYTRAN)

6.4 측정결과

<그림 7>, <그림 8>은 K교회에서 측정된 슬래브 및 보의 가속도-주기의 관계를 나타낸다. <그림 7>에서 보면 가장 탁월한 주파수를 보이는 것이 슬래브에 대한 고유진동수의 값이고 앞부분의 약하게 보이는 주파수가 K교회 프리플렉스 보의 고유진동수를 나타내는 것이다.



<그림 7> K교회 슬래브의 고유진동수



<그림 8> K교회 보의 고유진동수

다음 <표 5>와 <표 6>은 프리플렉스 보를 적용한 건물의 고유진동수를 측정된 것이다.

<표 5> 프리플렉스보의 고유 진동수 (Hz)

건물명	측정회수				평균
	1회	2차	3차	4차	
K사옥	6.62	6.50	6.71	6.51	6.58
G공항	5.10	5.13	5.24	5.20	5.17
P오피스텔	6.88	6.91	6.94	6.94	6.91
K교회	6.66	6.63	6.38	6.38	6.51
J교회	4.69	4.73	4.59	4.54	4.64

<표 6> 슬래브의 고유 진동수 (Hz)

건물명	측정회수				평균
	1회	2차	3차	4차	
K사옥	16.92	17.52	17.25	17.50	17.30
G공항	20.69	20.94	20.84	20.63	20.77
P오피스텔	14.94	15.75	15.44	15.81	15.48
K교회	25.5	25.19	25.81	25.41	25.48
G교회	36.56	36.75	36.88	36.94	36.78

7. 전산해석

측정대상건물의 프리플렉스 합성보와 슬래브에 대해서 유한요소해석 프로그램을 이용하여 전산해석을 실시하였다. 프리플렉스 합성보 및 슬래브의 단면은 등가의 콘크리트 단면으로 환산하여 각 경계조건을 단순지지로 적용하여 해석한 결과 <표 7>과 같다.

<표 7> 전산해석에 의한 고유진동수(Hz)

건물명	보	슬래브
K사옥	6.34	18.67
G공항	4.02	24.18
P오피스텔	6.74	18.74
K교회	4.54	27.88
J교회	3.28	34.24

8. 진동평가

8.1 고유진동수에 의한 검토

일본건축학회 및 CEN EC 3/1에서 제시하는 진동평가 기준에 의하여 측정대상 건물의 진동평가를 검토한 결과는 <표 8>, <표 9> 및 <표 10>과 같이 나타났다. 표에서 보는 바와 같이 측정대상 건물에서 측정된 값은 모두 기준에서 제시하는 허용기준을 만족하는 것으로 나타났다.

<표 8> 프리플렉스 합성보의 고유진동수

건물명	실측 (Hz)	전산 (Hz)	규준식에 의한 결과		
			Euro- code (Hz)	일본건축학회 고유진동 수(Hz)	만진폭 (μm)
K 사옥	6.58	7.83	7.847	7.847	12.90
G 공항	5.17	4.37	4.380	4.380	10.07
P 오피스텔	6.91	5.50	5.501	5.501	20.87
G 교회	6.51	5.34	5.350	3.350	15.00
J 교회	4.64	4.22	4.225	4.225	19.41
S 사옥	4.11	3.58	3.584	3.584	20.13

<표 9> 슬래브의 적합성 여부

건물명	실측치	허용기준	적합성
K사옥	17.30	15	O.K
G공항	20.77	15	O.K
P오피스텔	15.48	15	O.K
K교회	25.48	15	O.K
J교회	36.78	15	O.K

<표 10> 프리플렉스 합성보의 적합성 여부

건물명	적합성 여부		
	Eurocode 3 허용치(Hz)	적합성	일본건축학회 적합성
K 사옥	3	O.K	O.K
G 공항	3	O.K	O.K
P 오피스텔	3	O.K	O.K
G 교회	3	O.K	O.K
J 교회	3	O.K	O.K
S 사옥	3	O.K	O.K

8.1 진동가속도에 의한 검토

진동가속도 레벨에 대한 측정은 발생하는 진동의 크기가 사람들에게 얼마나 불편감을 주는지를 조사하기 위한 것이다. 이를 위해 각 주파수당 가속도 값을 4장에서 제시한 <식 11>를 적용하여 진동가속도 값으로 환산하였다. 이러한 값들은 각 주파수당 평균값을 취하는 옥타브 분석을 통하여 비교되나 본 측정기기는 가속도를 진동가속도 레벨로 변환하지 못하기 때문에 가장 취약한 값은 가속도 피크치를 이용하여 비교하였다. <표 11>에서 나타난 것처럼 모든 값이 생활진동 규제법 시행규칙에 지정하고 있는 허용기준인 65dB 이하이므로 진동장해에 대한기준은 만족하는 것으로 나타났다.

<표 11> 국내기준에 의한 진동 가속도레벨

건물명	진동가속도설요값 (10^{-3}m/s^2)	진동가속도레벨 (dB)
K사옥	0.0079265	57.9816
G공항	0.0056304	55.0108
P오피스텔	0.0079262	57.9813
K교회	0.006748	56.5835
J교회	0.0079262	57.9813

9. 결론

장스팬의 구조물에 주로 적용되는 프리플렉스

합성보는 일반적인 구조물에 비하여 고유진동수가 낮은 단점이 있다. 따라서 사용자의 보행 주기와 보 자체의 주기가 일치할 경우 공진현상을 발생시킬 가능성도 배제할 수 없으므로 진동을 평가하기 위하여 이미 사용되고 있는 5 종류의 건물을 선정하여 진동을 측정하였다. 측정결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

① 일반적인 철근콘크리트 및 철골구조와는 달리 보의 진동수가 슬래브 진동수보다 낮은 것으로 나타났다.

② 일본 건축학회 및 Eurocode 3에서 제시하는 고유진동수에 의해 평가한 결과 보 및 슬래브에서 모두 허용기준을 만족하는 것으로 나타났다. 또한 진동가속도에 의해 평가한 결과 허용기준을 만족하는 것으로 나타났다.

③ 국내 진동장해 평가 기준에 의해 평가한 결과 허용기준을 만족하는 것으로 나타났다.

④ 전산해석 및 기준식에서 제시하고 있는 진동식에 의해 산출된 진동수와 실측값과 비교할 때 다소 차이가 있는 것으로 나타났다.

따라서 프리플렉스 합성보를 적용한 건물의 진동은 사용성에 문제가 없는 것으로 판단되었다. 그러나 향후 새로운 건물에 적용하기 위한 진동의 예측에 있어서는 보다 많은 측정을 통하여 정확한 진동식의 개발이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) 김 태운, 김 희철, “합성데크를 사용한 바닥판의 동적하중 이론식 개발,” 한국지진공학회 춘계학술발표회 논문집, 제 3권 제 1호, 1999년.
- (2) 김치윤, “슬래브 진동 해석용 전산프로그램 개발에 관한 연구,” 연세대학교 건축공학과 석사학위논문, 1994.
- (3) 최원호, 김기철, 이동근, “보행 이동하중 효과를 고려한 건물 바닥판의 진동평가,” 대한건축학회 학술발표회논문집, 19권 1호, pp.69~74, 1999.
- (4) 김우영, “경계조건의 조절에 따른 합성 데크플

레이트 슬래브의 거동특성에 관한 연구,” 경희대학교 석사학위논문, 1998, pp.31~32.

(5) Allen, D.E. and Murray, T.M, “Design Criterion for Vibration Due to Walking,” AISC Engineering Journal 4th, 1993, pp.117~129.

(6) Hugo Bachmann and Walter Ammann (1987), “Vibrations in Structures - Induced by Man and Machines,” IABSE-AIPC-IVBH, pp13~