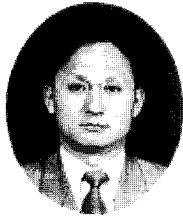


정밀방진이 필요한 바닥구조의 진동평가



김 용 구*



이 성 수**

1. 서 론

건축시공과 구조해석 기술의 발전, 재료의 고강도화 등으로 재료의 합리적인 사용이 가능해졌으며, 구조체가 장스팬화되고 경량화됨에 따라 사용자에게 불쾌감을 유발하는 진동문제가 대두되고 있다. 또한 경제, 생활 수준의 향상으로 인하여 사용자들의 건물에 대한 만족도는 건축적, 외장적인 측면에서의 고급화 뿐만 아니라 진동이나 소음 등의 사용성 측면에서도 요구하는 만족도 수준이 높아지고 있다.

건축물에서의 진동조절은 효율적이고 경제적이어야 한다. 이를 위하여 우선 건물 사용자들의 진동에 대한 체감도를 합리적으로 평가할 수 있는 평가기준이 있어야 하고, 이에 맞춰 설계할 수 있는 설계체계가 필요하다. 이미 시공된 건축물은 측정장비를 사용하여 진동을 측정하고 평가할 수 있으나, 기 시공된 건축물에서는 진동문제가 발생하였을 때, 이를 보완하는 방법에 비용이 많이 요구되므로 비경제적이다. 그러므로 가능하면 시공 전 설계 단계에서 진동수준을 미리 예측하고 이를 부재설계

에 반영하는 것이 합리적이며 경제적인 방법이다.

건물을 둘러싼 사회환경이나 자연환경에 의해 여러가지 진동이 발생하고 건물에 영향을 미치고 있다. 진동은 크게 인공적인 진동과 자연진동의 두 가지로 나눌 수 있다. 자연진동이란 바람이나 지진 등에 의해 발생하는 진동이며, 인공적인 진동에는 자동차, 열차, 지하철 등의 교통기관에 의한 진동, 건물내의 설비기기에 의한 진동, 공장 내의 공작기계나 건설공사의 항타기 등으로부터 발생하는 진동, 사람의 보행에 의한 주행진동 등이 있다.

각종 진동원으로부터 발생된 진동은 여러가지 경로를 거쳐 건물에 도달하고, 그것이 사람 또는 기기, 장치로 전해진다. 전달된 진동의 크기나 진행방향은 진동원의 종류, 진동원으로부터의 거리, 지반의 성질, 건물의 기초형식, 구조종별, 구조시스템 등에 영향을 받는다. 건물 내의 사람이나 기기, 장치에 대한 허용값은 대상물에 따라 다르며, 일반적으로 그들의 허용값이 만족되지 않는 경우에는 진동대책이 필요하다.

지진에 대해서는 수동 또는 능동적인 방법으로

* 삼성물산 건설부문 건축사업본부 건축기술팀
건축구조기술사

** 군산대학교 건축공학과 교수

약술기사

내진설계를 통해 구조체의 안전성을 확보할 수 있는 설계가 필요하며 중소지진이나 교통진동, 강풍에 대해서는 거주자의 불편감, 불안감을 감소시키는 것이 목표이다. 반도체제작, 전자현미경, 미술품 인쇄 등 미소진동의 제어가 필요한 공간에서는 작업성, 기능성의 확보를 위한 제진장치가 필요하다.

2. 정밀기기의 허용진동 기준

정밀기기를 지지하는 바닥에 기기의 허용진동환경을 제공해 주기 위해 설계자는 최대 허용진동수준을 결정해야 할 필요가 있다. 장비에 대해 정확히 알고 있다면 장비 제조업자로부터 진동수준에 대한 자료를 구할 수 있으며, 이 제한치는 장비의 지지대에서의 진동, 즉 장비 아래 바닥에서의 진동에 대한 제한값이다. 만약 서로 다른 진동 민감도를 갖는 여러 개의 장비가 한 바닥에 놓여져 있다면

일반적으로 가장 민감한 진동수준에 맞추어 설계한다. 그러나 장비에 대해 정확한 사항을 알지 못

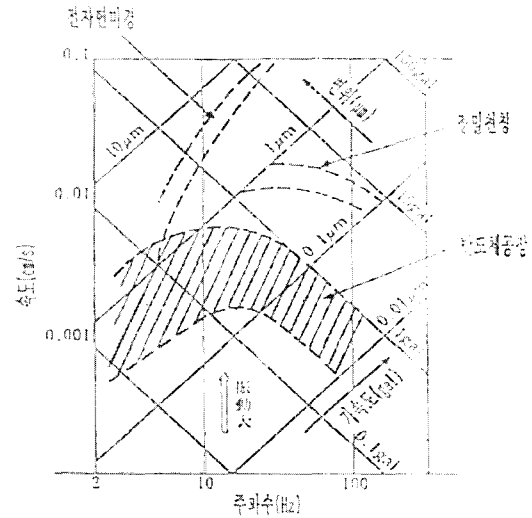


그림 1 정밀기기의 허용진동수준

표 1 정밀기기의 허용진동치

정밀기기의 용도	진동속도 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)
송풍기, 원심분리기, 전기엔진과 같은 회전기계 : 경량고속 세공용 압단기, 정밀천공기 : 바이브레이터, 체거름기, strewing 기계와 같은 진동기계	4000이상
정밀을 요하는 선반, 절단, 천공의 금속세공기계 : 방적기계 : 인쇄기계	4000
불베어링, 톱니바퀴, 면도날 등의 분쇄기 : 수십 μm 단위의 정밀도를 요하는 선반세공, 평삭기계	1000
컴퓨터실, 수술실, 외과수술실, 100배율 현미경	200
현미경, 간섭계, optimizer와 같은 광학기계 : 마이크로 단위의 기계측정 장치, 정밀스케일 측정기계 : 광학렌즈의 마무리작업 : 정밀절단기 : rotor balancing 기계와 중량의 정밀기기 : 실험실로봇	100
400배율 현미경작업대, 정밀천칭, Coordinate measuring machines, 계량실험실, 광학정밀비교측정기, Microelectronics manufacturing equipment Class A	50
극소외과수술, 안과수술, 신적수술, 400배이상 현미경작업대, 진동절연 테이블 위의 광학기기, Microelectronics manufacturing equipment Class B	25
30000배율 전자현미경, 검경용 박편절단기, 자기공명기, Micro-electronics manufacturing equipment Class C	12
30000배율 이상의 전자현미경, Mass spectrometers, Cell implant equipment, Microelectronics manufacturing equipment Class D	6
Microelectronics Manufacturing equipment Class E, Unisolated laser and optical research systems	3
(반도체공장 진동등급)	
Class A : 정밀조사, 정밀시험, 이외의 제조업 지지장비	
Class B : Aligners, steppers, and other critical equipment for photolithography with line widths of 3 microns or more.	
Class C : Aligners, steppers, and other critical equipment for photolithography with line widths of 1 micron.	
Class D : Aligners, steppers, and other critical equipment for photolithography with line widths of 1/2 micron ; includes electron-beam systems.	
Class E : Aligners, steppers, and other critical equipment for photolithography with line widths of 1/4 micron ; includes electron-beam systems.	

한다면 설계자는 일반적인 기준에 의존해야 한다. 일반적으로 사용되는 정밀기기의 진동제한 기준은 그림 1, 표 1과 같다.

그림 1은 정밀기기의 진동허용치를 변위와 속도, 가속도의 3축 곡선에 표현한 것이다. 표 1을 사용하여 단일진동수나 넓게 분리되어 위치한 진동수대에서 발생하는 진동에 의한 영향을 검토할 수 있다. 그림 2는 현미경과 시각관찰용의 확대기기들에 대한 기준으로서 평가곡선은 광학장비의 확대배율이 높아질수록 엄격해진다. 40배의 상한곡선은 보통 수술실용도에 적용될 수 있으며 하한곡선은 400배율은 laboratory bench microscopes에 대해 적용할 수 있다.

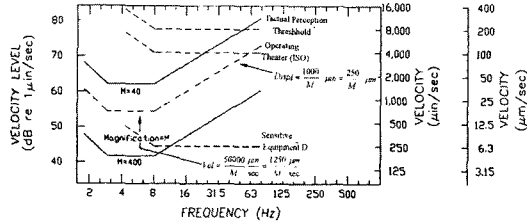


그림 2 현미경에 대한 기준

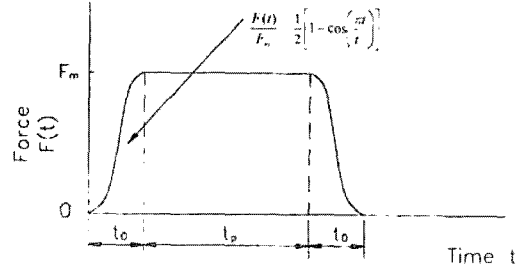


그림 3 이상화된 보행가진력

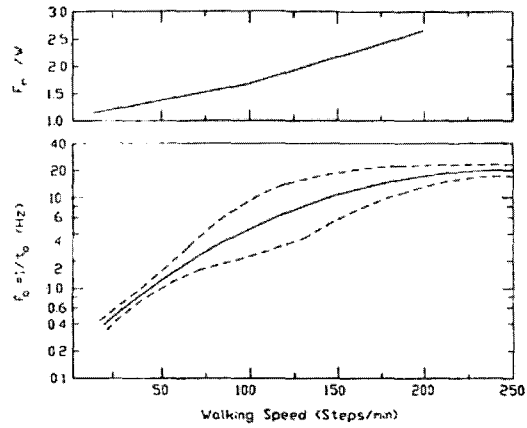


그림 4 최대가진력 F_m 과 작용주기 t_0

3. 바닥구조의 진동평가

3.1 바닥구조의 진동평가 절차

정밀기기가 설치되는 바닥에 대하여 진동의 적합성을 검토하기 위한 순서를 정리하면 다음과 같다.

- ① 설계 적재하중보다 약간 큰 정적 적재하중에 대해 바닥을 설계한다.
- ② 가진 종류에 따라 진동의 최대속도를 계산한다.
- ③ 예상되는 최대속도와 기준치를 비교한다.
- ④ 기준을 만족하도록 강성비 등을 조정하여 바닥구조의 설계를 변경한다.

3.2 진동평가 방법

그림 3은 보행가진력을 이상화한 것으로서, 최대 힘 F_m 과 작용주기 t_0 는 보행자의 체중 W 와 보행속도에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 이에

대한 함수관계는 1970년에 Galbraith와 Barton의 연구에 의하여 그림 4가 제시되었다.

보행가진에 의한 진동응답은 등가의 스프링-질량 시스템으로 해석할 수 있다. 여기에서, 스프링 지지된 질량의 최대변위 X_{max} 는 스프링-질량시스템의 고유진동수 f_n 과 보행가진력에 대한 함수로 구해진다. 그리고, 유사정적변위 X_{static} 은 F_m 하중이 정적으로 작용하는 경우에 대한 변위를 의미한다.

동적증폭계수 A_m 의 상한값은 그림 5와 같이 $f_n t_0$ 의 값에 좌우되며, 계산의 편의상 식(1)과 같이 상한곡선을 단순화할 수 있다.

$$A_m = \left. \begin{aligned} \frac{X_{max}}{X_{static}} &= 2 && \text{for } f_n t_0 \leq 0.5 \\ &= \frac{1}{2(f_n t_0)^2} && \text{for } f_n t_0 > 0.5 \end{aligned} \right\} (1)$$

첫번째 식은 그림 5 좌측의 상한선에 해당하고, 두번째 식은 그림 5의 점선을 나타낸다. 보행에 의한

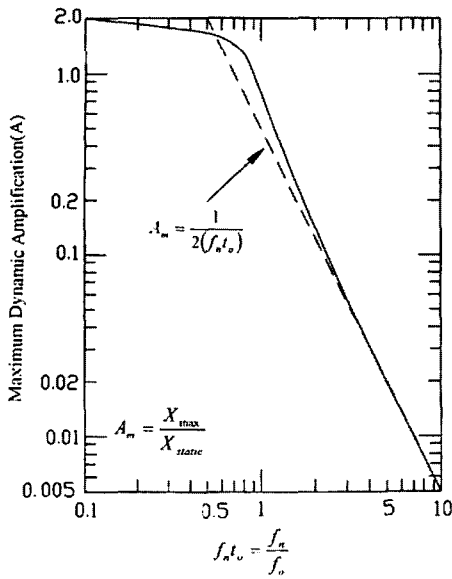


그림 5 보행에 의한 최대 동적처짐

바닥의 최대변위를 결정하기 위해 집중하중 F_m 에 의한 바닥의 정적변위는 $X_{static} = F_m \Delta_p$ 로 계산되며, 여기에서 Δ_p 는 단위 집중하중에 대한 바닥처짐을 의미한다. 하중작용점의 연성도 Δ_p 는 관심부분의 집중하중을 가정하여 처짐을 계산하고 하중에 대한 처짐의 비를 결정하여 정적해석으로 구한다. 이 처짐 계산에서 슬래브와 데크의 국부적인 변형은 무시하며, 보와 거더의 변형은 합성보의 작용을 포함하여 고려한다.

바닥구조의 고유진동수는 5Hz보다 큰 경우가 일반적이므로, 위의 두 번째식을 적용하게 되며, 최대변위는 식(2)로 정리된다.

$$X_{max} = \frac{F_m \Delta_p f_o^2}{2f_n^2}, \quad f_o = 1/t_o \quad (2)$$

그리고, 보행에 의한 바닥의 진동은 바닥구조의 고유진동수에 맞추어 진동하므로 최대진동속도는 식(3)과 같다.

$$V = 2\pi f_n X_{max} \quad (3)$$

$f_n/f_o \gg 0.5$ 인 경우는 식(4)와 같다.

$$V = U_v \Delta_p / f_n, \quad U_v = \pi F_m f_o^2 \quad (4)$$

U_v 는 평가가 편리하도록 도입된 변수로 보행속도와 보행자의 하중에 대한 상수이다. 예를 들어 84kg 사람이 1분당 100보의 속도로 빠르게 보행할 때 그림 4에서 $F_m/W=1.7$, $F_m=1.7(9.81 \times 84)=1.4\text{kN}$, $f_o=1/t_o=5.0\text{Hz}$ 이고, $U_v = \pi \times 1.4 \times 5.0^2 = 110\text{kN} \cdot \text{Hz}^2$ 이 된다. 표 2는 84Kg의 보행자에 대한 U_v 값을 보행속도 별로 정리한 것이다.

표 2 보행하중의 충격계수(기준 : 84Kg의 보행자)

분당 보행수	F_m/W	F_m [kN]	$f_o=1/t_o$ [Hz]	U_v [kNHz ²]
100(빠른보행)	1.7	1.4	5.0	110
75(보통보행)	1.5	1.25	2.5	25
50(느린보행)	1.3	1.1	1.2	6.8

식(4)를 변형하여 다음의 식(5)와 같은 설계기준 식으로 정리할 수 있다.

$$\frac{\Delta_p}{f_n} \leq \frac{V}{U_v} \quad (5)$$

즉, Δ_p/f_n 의 비는 장비에 대한 특정속도 V 를 U_v 로 나눈 값보다 작아야 한다. 예를 들어 앞에서 제시한 빠른보행의 상태에서 제한속도가 25m/sec인 경우를 살펴보자. Δ_p/f_n 은 $V/U_v = 25 \times 10^6 / 110 = 0.23 \times 10^6 \text{m/kN-Hz}$ 보다 작아야 한다. 느린보행에 대해서는 15배 이상 또는 $3.7 \times 10^6 \text{m/kN-Hz}$ 까지 허용치가 높아진다.

바닥의 고유진동수가 단위하중에 의한 처짐 Δ_p 의 제곱근에 반비례하므로, 속도 V 는 $(\Delta_p)^{3/2}$ 에 비례한다. 구조시스템에서 경미한 변경만으로도 강성의 변화를 유도할 수도 있으므로 이 비례식은 경미한 설계변경의 대략적인 평가에 유용하다. 질량을 크게 변화하지 않으면서 강성의 변화만으로 고유진동수를 조절하는 것이 가능하므로 주어진 바닥에서 속도기준을 만족시키기 위해서는 강성을 얼마나 변화시켜야 하는지에 대한 평가가 가능해진다. 만약 초기변형 Δ_{pl} 으로 속도 V_1 이 정해지면

V_2 의 속도를 정하는 Δ_{p2} 는 다음의 식(6)으로 구할 수 있다.

$$\frac{\Delta_{p2}}{\Delta_{p1}} \approx (V_2/V_1)^{2/3} \quad (6)$$

예를 들어, 특정한 바닥에서 보행에 의한 진동속도가 $50 \mu\text{m}/\text{sec}$ 이고 요구되는 장비의 속도 제한치가 $12 \mu\text{m}/\text{sec}$ 이면, 바닥의 연성도는 $(12/50)^{2/3} = 0.4 = 1/2.5$ 로 낮아져야 한다. 즉, 바닥의 강성이 2.5 배 증가되어야 한다.

3.3 진동평가의 계산예제

그림 6과 같은 바닥구조 위에 정밀기기가 놓이는 경우에서, 바닥구조의 진동을 검토해보자. 보와 거더의 스패ンは 9m, 보의 간격은 3m이고, 슬래브 위에 30mm의 몰탈마감을 한다. 건물의 용도가 일반사무실인 경우에 바닥구조의 고유진동수는 5.63Hz로 계산된다.

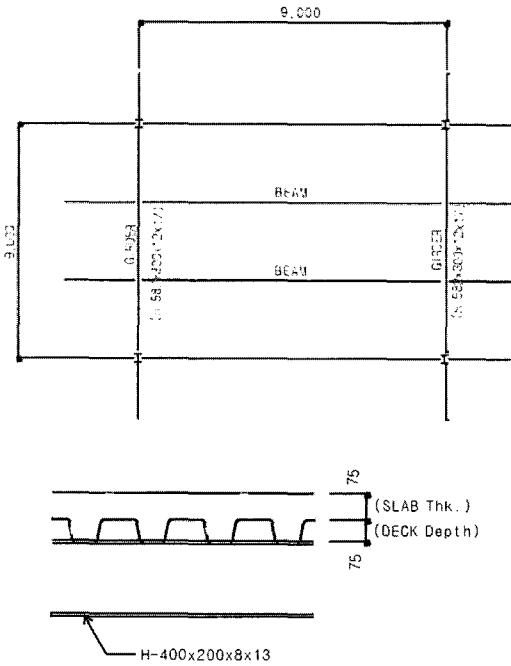


그림 6 바닥구조 평면도와 단면도

(설계 자료)

고정하중=슬래브+마감+테크자중=290kgf/m²

지속하중=적재하중×15%=250kgf/m²×0.15
=37.5kgf/m²

경량콘크리트 $w_c=1.7\text{Kgf}/\text{m}^3$

콘크리트강도 $f_c=240\text{kgf}/\text{cm}^2$

바닥구조의 두께=7.5mm+7.5mm rib=15mm

$E_c=0.136w_c^{1.5}(f_c)^{1/2}=0.136 \times 1,700^{1.5} \times 240^{1/2}$
=147,678kgf/cm²

$n=E_s/1.35E_c=2,100,000/(1.35 \times 147,678)=10.53$

Beam : H-400×200×8×13($I_b=83,645.25\text{cm}^4$,
 $w_b=1,049\text{kgf}/\text{m}$, $\Delta_b=0.51\text{cm}$)

Girder : H-588×300×12×17($I_g=273,258.1\text{cm}^4$,
 $w_g=3,287\text{kgf}/\text{m}$, $\Delta_g=0.49\text{cm}$)

• mid span flexibility

$$\Delta_{ob} = \frac{L_b^3}{96E_sI_b} = \frac{100 \times 900^3}{96 \times 2,100,000 \times 83,645.25}$$

$$= 0.004323 \text{ cm}/100\text{kg} = 0.004323 \text{ cm}/\text{kN}$$

$$\Delta_{gp} = \frac{L_g^3}{96E_sI_g} = \frac{100 \times 900^3}{96 \times 2,100,000 \times 273,258.1}$$

$$= 0.00132 \text{ cm}/100\text{kg} = 0.00132 \text{ cm}/\text{kN}$$

$$(0.018 \leq \frac{d_e}{S} = \frac{11.25}{300} = 0.0375 \leq 0.208)$$

$$4.5 \times 10^6 \leq \frac{L_b^4}{I_b} = \frac{900^4}{83,645.25}$$

$$= 7.844 \times 10^6 \leq 257 \times 10^6$$

$$2 \leq \left(\frac{L_b}{S} \right) = 900/300 = 3 \leq 30 \quad \text{OK !}$$

$$N_{eff} = 0.49 + 34.2 \frac{d_e}{S} + (9.0 \times 10^{-9}) \frac{L_b^4}{I_b}$$

$$- 0.00059 \left(\frac{L_b}{S} \right)$$

$$+ (9.0 \times 10^{-9}) \frac{900^4}{83,645.25}$$

$$= 0.49 + 34.2(11.25/300)$$

$$- 0.00059 \left(\frac{900}{300} \right)$$

$$= 0.49 + 1.28 + 0.0706 - 0.00177 = 1.84$$

$$\Delta_p = \frac{\Delta_{ob}}{N_{eff}} + \frac{\Delta_{gp}}{2} = \frac{0.004323}{1.84} + \frac{0.00132}{2}$$

$$= 0.00235 + 0.00066 = 3.0095 \times 10^{-3} \text{ cm}/\text{kN}$$

학술기사

바닥의 고유진동수가 4.05Hz로 보행하중에 의한 진동수에 대한 비 f_n/f_o 가 2보다 현저히 크지 않으므로 다음식으로 계산한다.

빠른 보행에 대해 살펴보면,

$$F_m/W = 1.7$$

$$F_m = 1.7 \times 84 \times 9.81 = 1.4 \text{ kN}$$

$$f_o = 5 \text{ Hz} \text{ 이므로 } f_n/f_o = 1.126$$

보행에 의한 최대 동적처짐곡선에서 $A_m = 0.41$

$$A_m = \frac{X_{\max}}{X_{\text{static}}} = \frac{1}{2(f_n/f_o)^2}, \text{ for } f_n/f_o > 0.5$$

$$X_{\text{static}} = F_m \cdot \Delta_p$$

$$\begin{aligned} X_{\max} &= A_m X_{\text{static}} = A_m F_m \Delta_p \\ &= 0.41 \times 1.4 \times 0.00301 = 0.001728 \text{ cm} \\ &= 17.3 \mu\text{m} \end{aligned}$$

최대진동속도

$$\begin{aligned} V &= 2\pi f_n X_{\max} = 2 \times \pi \times 5.63 \times 17.3 \\ &= 611.67 \mu\text{m}/\text{sec} \end{aligned}$$

정밀기기 진동기준에 따르면 이 바닥 중앙부에 위치한 정밀기기는 빠른 보행에 대해 어떠한 정밀기기도 만족하지 못하는 수준이다. 따라서, 느린보행에 대하여 검토하기로 한다.

$$F_m/W = 1.3$$

$$F_m = 1.3 \times 84 \times 9.81 = 1.07 \text{ kN}$$

$$f_o = 1.2 \text{ Hz} \text{ 이므로 } f_n/f_o = 4.69,$$

$$A_m = \frac{X_{\max}}{X_{\text{static}}} = \frac{1}{2(f_n/f_o)^2}, \text{ for } f_n/f_o > 0.5$$

$$X_{\text{static}} = F_m \cdot \Delta_p$$

$$\begin{aligned} X_{\max} &= A_m X_{\text{static}} = F_m \Delta_p / 2(f_n/f_o)^2 \\ &= 1.07 \times 0.00301 / (2 \times 4.69^2) \\ &= 0.0000732 \text{ cm} = 0.732 \mu\text{m} \end{aligned}$$

최대진동속도

$$\begin{aligned} V &= 2\pi f_n X_{\max} = 2 \times \pi \times 5.63 \times 0.732 \\ &= 25.9 \mu\text{m}/\text{sec} \end{aligned}$$

정밀기기 진동기준에 따르면, 느린보행에 대해서는 400배 이상의 현미경작업대, 미세수술, 안과수술, 신경수술, Class B의 반도체공장 등의 정밀기기가 이 바닥 중앙부에 놓여질 수 있는 수준이다. 만약, 빠른 보행에 대해서도 이 수준을 만족하고 싶다면 다음과 같은 비례식을 사용하여 바닥의 강성을 8.4배 이상 키워 주어야 한다. 이 바닥에서는 보의 영향이 더 크므로 보의 강성을 키워주고, 가능하다면 스패ンを 줄여서 필요한 강성을 확보하도록 한다. 증가시킬 강성비는 다음과 같이 계산되었다.

required flexibility ratio(연성비) :

$$\begin{aligned} \Delta_p / \Delta_{p1} &= (V_2 / V_1)^{2/3} = (25 / 611.67)^{2/3} \\ &= 0.119 = 1/8.4 \end{aligned}$$

required stiffness ratio(강성비) : 8.4 배

3.4 진동평가 과정의 프로그래밍

진동평가 과정은 매우 복잡한 절차로 진행되므로 평가과정을 충분히 이해한 상태에서 이러한 절차를 프로그램으로 정리하여 사용하는 것이 계산과정에서의 오류를 적게 할 수 있다. 그림 7은 EXCEL의 매크로 기능을 활용하여 진동평가 과정을 프로그램화 한 것의 출력물 사례이다.

4. 바닥구조의 수직진동 제어를 위한 설계지침

4.1 보행진동의 저감을 위한 설계지침

보행에 의한 바닥의 수직진동을 감소시키는 주된 구조적인 방법은 바닥의 연성(flexibility)를 감소시키는 것, 즉 강성을 키우는 것이다. 연성의 검토식에서 보의 처짐과 거더처짐의 1/2을 비교하여 어떤 것이 전체 연성에 큰 영향을 주는가 살펴보고

SENSITIVE EQUIPMENT VIBRATION CHECK due to Human activity (by AISC Steel Design Guide Series II : Allen & Murray 1997)																					
SYSTEM ID :	type1																				
1. DESIGN DATA																					
$f_c = 240 \text{ kg/cm}^2$	$F_y = 2400 \text{ kg/cm}^2$																				
$\omega_c = 1.7 \text{ l/m}^3$	$E_s = 2000000 \text{ kg/cm}^2$																				
$E_c = 146625 \text{ kg/cm}^2$	Beam soacing = 300 cm																				
Beam Length = 900 cm	eff Beam spac. = 300 cm (for i_{10})																				
Girder Length = 900 cm	eff Gir.slab spa = 360 cm (for i_{10})																				
DEAD LOAD = 208 kg/m ²	LIVE LOAD = 250 kg/m ²																				
(w/o rib conc. wgt.)	partic L.L = 37.5 kg/m ²																				
Rib Conc. = 78 kg/m ²	Participate rate = 15.0% (10 - 25 %)																				
Thk. of Slab = 7.5 cm	Depth of Rib = 7.5 cm																				
$c_e = 11.25 \text{ cm}$	$n = 10.10$																				
2. BEAM PANNEL MODE																					
2.1 BEAM PROPERTIES																					
TRY : H - 400 x 200 x 8 x 13																					
H = 400 mm	B = 200 mm	wgt. = 66.03 kg/m																			
$t_w = 8 \text{ mm}$	$t_f = 13 \text{ mm}$	$r = 16 \text{ mm}$																			
$A_x = 84.1 \text{ cm}^2$	$Z_x = 1185 \text{ cm}^3$	$I_x = 23704 \text{ cm}^4$																			
$y_b = 43 \text{ cm}$	$I_y = 85210 \text{ cm}^4$																				
2.2 NATURAL FREQUENCY & WEIGHT																					
$w_b = 1035 \text{ kg/m}$																					
$\Delta_g = 5w^4 / 384E_s I_b = 0.5190 \text{ cm}$																					
$f_g = 0.18 \sqrt{g/\Delta_g} = 7.82 \text{ Hz}$																					
$D_g = 1174.3 \text{ cm}^3/\text{m}$																					
$D_b = 28403.3 \text{ cm}^3/\text{m}$																					
$B_g = 2(D_g/D_b)^{1/4} L_g = 812 \text{ cm}$	$< 2/3 \times 3 \times L_g = 1800 \text{ cm}$																				
$W_g = 1.5 \times w B_g L_g = 37.82 \text{ ton}$																					
3. GIRDER PANNEL MODE																					
3.1 GIRDER PROPERTIES																					
TRY : H - 582 x 300 x 12 x 17																					
H = 582 mm	B = 300 mm	wgt. = 136.97 kg/m																			
$t_w = 12 \text{ mm}$	$t_f = 17 \text{ mm}$	$r = 28 \text{ mm}$																			
$A_x = 174.5 \text{ cm}^2$	$Z_x = 3530 \text{ cm}^3$	$I_x = 102710 \text{ cm}^4$																			
$y_o = 56 \text{ cm}$	$I_y = 286899 \text{ cm}^4$																				
3.2 NATURAL FREQUENCY & WEIGHT																					
$w_g = 3243 \text{ kg/m}$																					
$\Delta_g = 5w^4 / 384E_s I_b = 0.4828 \text{ cm}$																					
$f_g = 0.18 \sqrt{g/\Delta_g} = 8.11 \text{ Hz}$																					
$D_g = 31877.7 \text{ cm}^3/\text{m}$																					
$B_g = 1.8(D_g/D_b)^{1/4} L_g = 1574 \text{ cm}$	$< 2/3 \times 3 \times L_g = 1800 \text{ cm}$																				
$W_g = w B_g L_g = 51.04 \text{ ton}$																					
4. COMBINED MODE PROPERTIES																					
$L_g > B_g$	$\Delta_g = 0.4828 \text{ cm}$																				
$f_g = 0.18 \sqrt{g/(L_g + \Delta_g)} = 5.63 \text{ Hz}$																					
$W = \Delta_g/(L_g + \Delta_g) W_i + \Delta_g/(L_b + \Delta_g) W_o = 44.19 \text{ ton}$																					
5. FLOOR MIN. STIFFNESS CHECK																					
---> Minimum Stiffness Requirement of 1kN per mm Does Not Apply !																					
$\Delta_{op} = L^3 / 96 E_s I_g = 0.0045 \text{ cm/kN}$																					
$\Delta_{ip} = L^3 / 96 E_s I_g = 0.0013 \text{ cm/kN}$																					
$0.018 \leq d_p/S = 0.038 \leq 0.208$	----> OK!																				
$4500000 < d_p^4/I_g = 8E+06 < 257000000$	----> OK!																				
$? < L_p/S = 3.0 < 30$	----> OK!																				
$N_{eff} = 0.49 + 34.2 d_p/S + (9.0 \times 10^{-9}) L_g^4/I_g - 0.00059 (L_p/S)^2$																					
$= 1.836 \geq 1$																					
- Mid-bay Flexibility																					
$\Delta_g = \Delta_{op}/N_{eff} + \Delta_{ip}/2 = 0.0243 \text{ mm/kN}$	$< 1 \text{ mm/k}$ ----> OK!																				
6. MAXIMUM VELOCITY																					
Vibration Criteria for Sensitive Equipment : 200 $\mu\text{m/sec}$																					
Walking Pace = 2 (1 : fast / 2 : moderate / 3 : slow)																					
Walker Weight = 84 kg																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Walking Pace steps/minutes</th> <th>Fm/W</th> <th>Fm [kN]</th> <th>$f_p = 1/l_p$ [Hz]</th> <th>U_v [kN.Hz²]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>100 (fast)</td> <td>1.7</td> <td>1.40</td> <td>5</td> <td>110</td> </tr> <tr> <td>75 (moderate)</td> <td>1.5</td> <td>1.24</td> <td>2.5</td> <td>24</td> </tr> <tr> <td>50 (slow)</td> <td>1.3</td> <td>1.07</td> <td>1.2</td> <td>5</td> </tr> </tbody> </table>		Walking Pace steps/minutes	Fm/W	Fm [kN]	$f_p = 1/l_p$ [Hz]	U_v [kN.Hz ²]	100 (fast)	1.7	1.40	5	110	75 (moderate)	1.5	1.24	2.5	24	50 (slow)	1.3	1.07	1.2	5
Walking Pace steps/minutes	Fm/W	Fm [kN]	$f_p = 1/l_p$ [Hz]	U_v [kN.Hz ²]																	
100 (fast)	1.7	1.40	5	110																	
75 (moderate)	1.5	1.24	2.5	24																	
50 (slow)	1.3	1.07	1.2	5																	
$f_{com} = 5.63 \text{ Hz}$																					
$f_{com}/f_g = 2.25 > 0.5$																					
$A_{m1} = X_{m1d}/X_{1stz} = 0.0986$																					
$X_{1stz} = F_m \Delta_g = 0.0301 \text{ mm} = 30.0725 \mu\text{m}$																					
$X_{m1d} = A_{m1} \times X_{1stz} = F_m \Delta_g / 2(l_p/l_g)^2 = 2.9638 \mu\text{m}$																					
$V = 2\pi f_{com} X_{m1d} = 104.8 \mu\text{m} < V_{lim} = 200 \mu\text{m/sec}$																					
----> Mid-bay Position of This Floor is Acceptable !																					
7. Required Increasing Stiffness Ratio: 0.65																					
Flexibility Ratio : $\Delta_{p2}/\Delta_{p1} = (V_p/V_s)^2 = 1.5388$																					

그림 7 EXCEL을 이용한 진동평가

보고 큰 영향을 주는 부재의 강성을 키우는 것이 효과적이다. 이미 충분한 강성을 갖고 있는 부재의 강성을 증가시키는 것은 효과가 작다. 거더의 강성은 길이의 3층에 반비례하므로 건축적으로 가능한 범위에서 기둥간격을 줄이는 것도 강성증가에 효과적인 방법이 된다. 보와 거더, 거더와 기둥의 접합을 모멘트접합으로 변경하는 것은 비교적 작은 초기강성을 가져 아주 작은 보행과 같은 하중에 의한 모멘트에 대해서는 힌지와 같이 작용하므로 이와 같은 접합부의 변경은 바닥강성에 영향이 작다.

슬래브두께를 키우거나 콘크리트의 비중을 키워 건물의 질량을 증가시키는 것도 바닥진동의 감소에 효과적인 방법이나 하중의 증가로 기둥이나 기초에 불리한 영향을 줄 수 있으므로 경제성과 안전성을 고려하여 적용하는 것이 좋다.

보의 배치는 판넬의 크기에 따라 결정하는 것이 좋다. 9m×9m이상의 판넬에서는 보를 단변과 평행하게 배치하는 것이 유리하며, 이 때 보의 간격은

보길이나 거더길이가 10m이상에서는 간격을 줄이는 것이 유리하고 10m이하에서는 보를 바닥슬래브의 내력에 따라 걱정하게 배치하는 것이 좋다.

보의 길이에 대해서는 일반적인 통념과는 달리, 길이가 길어짐에 따라 진동에 따른 응답이 커지다가 10m 이상이 되면 다시 감소하기 시작한다. 진동에 가장 불리한 양상을 보이는 보의 길이는 9m에서 12m 인 것으로 보인다. 보의 길이가 증가함에 따라 진동시 함께 연동하는 유효질량이 증가하나, 길이증가에 따라 보가 충분히 큰 강성을 갖게 되어 슬래브에 대한 보의 강성비가 커져 유효폭 증가를 제한한다.

외단부의 보는 외부벽체나 마감에 의해 보강되며, 보행이 많이 발생하지 않으므로 문제가 발생할 확률이 낮으나 지지되지 않은 오픈된 공간의 내단 부보에서는 진동문제가 발생하기 쉽다. 정적인 하중만을 고려하여 중앙부와 같거나 작은 크기의 부재를 사용하면 진동시 함께 연동하는 유효질량이

줄어 문제가 발생하기 쉽다. 그러므로 이런 공간에서 부재의 강성을 더 키워주는 것이 바람직하며 검토가 필요하다.

4.2 정밀기기가 놓이는 바닥구조의 설계지침

대부분의 경우, 바닥 전체의 강성을 키울 필요는 없다. 진동에 민감한 정밀기기가 위치한 스패만 보강하면 충분하다. 스패 중앙부에서의 진동이 가장 심각하므로 스패 중앙에서 진동기준을 만족하는 바닥은 어디에서나 이 기준을 만족할 것이다.

정밀기기가 스패 중앙에 위치하는 경우는 많지 않다. 또한 가장 심각한 진동을 야기하는 빠른보행은 정밀기기가 놓여진 곳과 거리를 두고 발생한다. 기기의 설치로 인하여 비좁은 공간에서는 동일 스패에서 느린보행을 하거나 인접복도에서 보통, 또는 빠른 속도의 보행이 발생하기도 한다. 이런 경우에는 다양한 보행의 경우를 고려하여 설계하여야 한다. 구조물의 기본모드에 대응하는 진동처짐은 정적하중으로 구한 것과 거의 일치하므로 보행 위치에서 집중하중으로 구한 정적처짐의 분포에 동적인 진동처짐이 비례한다고 가정함으로써 합리적인 평가를 할 수 있다.

기둥근처에서 발생하는 보행은 스패 중앙부에서의 보행보다 더 작은 진동을 발생시키며, 스패 임의점에서의 보행에 대한 진동은 기둥근처에서 스패 중앙부보다 현저히 작다. 또 진동이 기둥열을 지남에 따라, 바닥판을 지남에 따라, 또 이웃한 바닥의 기둥과 벽체를 경유하여 전파됨에 따라 약해진다. 이런 사항들을 적절한 기기배치에 적용한다. 중량물의 통행이 많은 복도는 가능한 정밀기기와 멀리 위치시키며, 정밀기기를 가능한한 기둥과 근접하여 위치시키는 것이 적절하다. 복도는 기둥열을 따라 배치시키며, 직선의 긴 복도에서는 빠른 보행이 일어날 수 있으므로, 이를 방지하기 위해 의도적인 장애물을 설치할 수도 있다.

또한 정밀기기에 도달하는 보행에 의한 진동을 감소시키기 위해 정밀기기바닥과 복도사이에 조인트를 사용하여 분리할 수 있다. 이러한 조인트는 단순한 시공조인트나 익스펜션 조인트보다 더

유연하게 하여야 한다. 어떤 경우에는 정밀기기와 보행에 대해 구조물을 분리하는 것이 적절할 수도 있다. 예를 들어 구조체 바닥에서 정밀기기를 지지하고, 보행이 발생하는 복도는 이와 분리하여 지반에 직접 지지된 기둥 위에 배치한다.

몇 개의 정밀기기가 놓여진 바닥에서 기기의 배치상태를 정확히 알지 못하거나 변경의 여지가 있는 경우에는 전체 바닥구조물의 진동제한을 만족시키는 것보다는 분리장치를 사용하여 방진시키는 것이 더 경제적일 수 있다. 적절한 분리장치나 시스템은 장비제조업자나 전문가로부터 얻을 수 있으나, 그런 장치들이 절연시킬 수 있는 방진양에는 제한이 있으므로 진동절연시스템이 아주 유연한 구조물에서 발생하는 진동문제를 모두 만족시킨다고 기대할 수 없다. 진동절연시스템과 구조물의 강성을 키우는 방법을 병행하는 것이 더 좋은 결과를 가져올 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. D.E. Allen, "Vibrational Behavior of Long-Span Floor Slabs", *Can. J. Civ. Eng.* Vol.1. 1974, pp.108~115
2. T. M. Murray, "Building Floor Vibrations, Engineering Journal", *AISC, 3rd Qtr.*, 1991, pp.102~108
3. D. E. Allen and T.M. Murray, "Design Criterion for Vibration Due to Walking, Engineering Journal", *AISC, 4th Qtr.*, 1993, pp.117~129
4. T. M. Murray, D.E. Allen, E.E. Ungar, "Floor Vibrations Due to Human Activity", *AISC Steel Design Guide Series 11*, 1997
5. Farzad Naeim, "Design Practice to Prevent Floor Vibrations", *Steel TIPS, Sep.* 1991
6. J. A. Laman, "Design Aids for Walking Vibrations in Steel Framed Floors", *Engineering Journal, 2nd Qtr*, 1999, pp.82~101
7. H. Bachmann, W. Ammann, "Vibrations in Structures induced by man and machines", *IABSE-AIPC-IVBH*, 1987 