

합성데크를 사용한 바닥판의 동적하중 이론식 개발 A Development of a Dynamic Load Function for a Composite Deck Floor System

김태윤*
Kin, Tae-Yun

김희철**
Kim, Hee-Cheul

ABSTRACT

Vibration problem occurring at the metal deck floor system not only reduces the serviceability of a building but also reduces the usability of a floor system. Most problem occurring at the metal deck floor results from the human movement such as walking and running. However, the vibration induced by running does not occur continuously except the special case. Therefore, the floor vibration due to walking was only considered on this paper. Vibration occurring due to human walking was measured and the corresponding load function was derived through the Fast Fourier Transform (FFT).

1. 서론

건물의 바닥판에서 발생하는 진동의 양상은 작용하는 하중과 구조물의 진동수 사이의 동적 관계에 따라 상호작용으로 영향을 받게 되며, 공진(resonance) 및 맥놀이(beating)현상과 같은 동적 거동이 발생할 수 있다. 이로 인한 진동은 거주자에게 불편감을 일으켜 건물의 사용성에 심각한 영향을 미칠 수가 있다. 또한 최근 환경에 대한 문제가 부각되면서 건축물에서도 공해진동에 대한 사람들의 인식이 변화하고 있으며, 공해진동과 소음에 대한 사용성이 건축물의 질을 평가하는 척도로 대두되고 있다. 그러므로 건축물에서 발생하는 진동에 대해 사용성을 평가할 수 있는 기준이 필요한 것으로 판단된다.

국내에는 바닥진동에 대한 사용성 기준이 존재하지 않으며, 국외에서는 바닥진동에 의한 사용성을 평가할 수 있는 기준이 존재하나 동적하중에 대한 엄밀한 평가가 진행되어 있지 않고 단지 기준에 구성된 몇몇의 이론식에만 의존하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 합성데크를 사용한 바닥 판에서 가장 일반적으로 나타나는 진동원인 사람의 보행에 의해 나타나는 응답을 측정하고, 동적특성을 파악한다. 그리고 측정된 응답을 이용하여 하중을 산정함으로써 바닥진동을 평가할 수 있는 동적하중 이론식을 제안하고자 한다.

* 경희대학교 건축공학과 석사과정

** 경희대학교 건축공학과 조교수, 정회원

2. 보행에 의한 응답의 측정

사람의 보행으로 인해 발생하는 하중을 예측하기 위하여 먼저 사람의 보행에 의한 바닥구조의 응답을 측정하여야 한다. 본 연구에서는 합성슬래브를 사용한 바닥구조에 대해 고유진동수와 실제 보행에 의한 응답가속도 변화를 구한 후 이를 수학적 방법을 이용하여 시간에 대한 동적하중 함수식으로 표현하였다.

응답가속도는 보행자의 몸무게에 비례하여 나타나며, 바닥의 마감재나 신발의 종류에 따라서도 어느 정도 다른 양상을 나타나게 된다. 본 연구에서는 일반적인 업무용 구조물의 바닥에서 구두를 신고 보행을 하는 경우를 그 대상으로 하였다.

2.1 측정구조물 및 측정방법

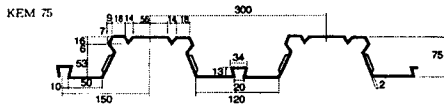


그림 1 데크플레이트 형상

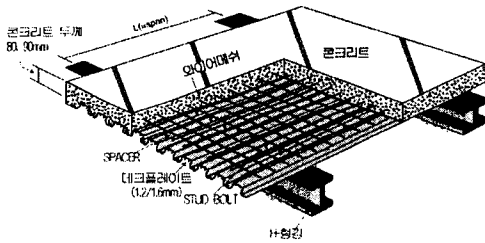


그림 2 데크플레이트를 사용한 슬래브 형상

본 연구에서 측정을 실시한 바닥구조는 KEM75-1.2t 데크 플레이트를 사용한 합성바닥구조이다. 측정대상 구조물은 L건설에서 시공중인 H생명 사옥 신축공사현장과, S건설에서 시공중인 S주식회사 사옥 증축공사 현장으로서, 용도는 업무용이며 철골철근 콘크리트 구조물이다. 바닥슬래브는 KEM75 deck plate를 사용한 합성바닥구조이며, 토핑은 80mm, 와이어 메쉬는 $\phi 8-100 \times 100$ mm를 사용하였다. 바닥마감과 설비의 설치는 이루어지지 않은 슬래브에서 측정을 수행하였으며, 이는 바닥마감과 설비가 설치되었을 경우 질량과 감쇠, 고

표 1 측정슬래브의 재원 및 측정지점

SLAB	형태와 지지조건	Beam Section
1		H-500X200X10X16 H-350X175X7X11
2		H-606X201X12X20
3		H-700X300X13X24 H-606X201X12X20 H-600X200X12X17 H-588X300X12X20 H-194X150X6X9
4		H-700X300X13X24 H-606X201X12X20 H-600X200X12X17 H-582X300X12X17
데크종류 : KEM75- $\phi 1.2$ 데크중량 : 14.54 kg/m^2 중립축 : 3.759 cm 단면2차모멘트 : 168.75 cm^4 단면계수모멘트 : $44.89 \text{ cm}^3/\text{m}$ 와이어 메쉬 : $\phi 8-100 \times 100$ 토핑 두께 : 80 mm		

유진동수가 불규칙적으로 변할 수 있기 때문이다. 메탈데크에 콘크리트만 타설하고 콘크리트의 설계강도가 재현되는 충분한 양생기간이 지난 후 측정하였다. 사용된 측정장비는 DYTRAN사의 SA390 Signal analyser를 사용하였으며, 센서는 가속도 센서인 3191A 2개를 사용하여 측정하였다. 샘플링은 4096 샘플로 측정하였으며, 측정슬래브의 형상 및 측정지점은 표 1과 같다.

측정방법은 먼저 바닥구조의 고유진동수를 파악하기 위해, 10kg의 모래주머니를 50cm 높이에서 떨어뜨려 자유진동 실험을 실시하였다. 한 측정지점에서 6회 이상의 반복측정을 하였으며, 측정 주파수 범위는 사람의 전신진동에 영향을 주는 주파수 범위로 알려진 100Hz까지 실시하였다. 주파수 범위위가 80Hz 이상일 때는 인체의 국부진동에 영향을 주며, 사람의 감각에 영향을 주는 범위는 40Hz 까지로 알려져 있다.

사람의 보행에 의한 구조물의 응답을 측정하기 위해 보로 구분되는 작은 슬래브의 중앙에 센서를 설치하고 30cm 떨어진 지점에서 제자리걸음을 함으로써 응답가속도를 측정하였다. 피실험자의 몸무게는 80kg이며 보행 주기는 0.5초, 즉 2Hz의 진동수를 가지는 주기하중으로 가진된다.

2.2 측정결과

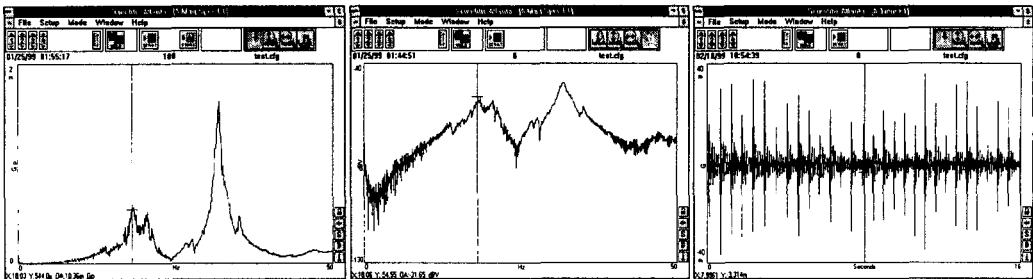


그림 3 주파수 분석예(CASE1) 그림 4 FFT 분석예(CASE1) 그림 5 응답가속도에(CASE2)

표 2 CASE별 고유진동수

측정지점	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4	CASE 5	CASE 5
고유진동수	18.03	8.887	8.417	8.396	10.542	10.608
평균값 (Hz)						

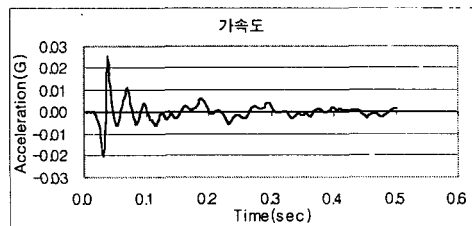


그림 6 가속도(CASE1)

슬래브의 고유진동수는 강성과 질량에 의해 결정되며, 강성과 질량은 많은 변수의 영향을 받고 있다. 합성슬래브에서 강성에 영향을 주는 요소로는 콘크리트의 물성치와 데크플레이트의 형상, 단부지지조건등이 있으며, 질량에 영향을 주는 요소로는 슬래브의 폭과 길이, 콘크리트 토핑두께, 데크플레이트의 두께, 와이어 메쉬, 보의 단면등을 고려할 수 있다. 일본의 데크플레이트 시공규준에서는 합성슬래브의 고유진동수를 15Hz 이상으로 제한하고 있다. 측정결과에서 볼 때, CASE1을

제외하고는 15Hz보다 현저하게 낮은 진동수를 나타낸다.

사람의 보행에 의한 가속도 응답은 그림 5와 같이 주기적인 응답을 나타낸다. 시간영역에 대한 가속도이며, 전체 시간은 16초이고 한 걸음의 주기는 0.5초이다. 가속도를 분석하기 위해 불규칙적인 가속도를 발이 지면에 닿는 시점을 기준으로 하나의 주기로 분할하여 평균값으로 연구를 진행하였으며 그 결과는 그림 6과 같이 나타났다.

3. 보행하중 산정

보행하중을 계산하기 위하여 운동방정식에 적용되는 변수들은 가속도와 속도, 변위 그리고 질량, 감쇠율, 고유진동수가 있다. 속도와 변위는 측정된 가속도를 직접적분법에 의해 구하게 된다.

외력이 작용하는 1자유도계 구조시스템의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\ddot{x} + 2\xi\omega\dot{x} + \omega^2x = \frac{F(t)}{m} \quad (3.1)$$

이 함수를 Taylor전개하고, $f^{(k)}(t)$ 를 $f(t)$ 의 k 차 도함수, 시간 t 에서의 진동가속도를 \ddot{x} , 시간 $t+\Delta t$ 에서의 진동가속도를 $\ddot{x}_{t+\Delta t}$ 라 하면,

$$f(t+\Delta t) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(\Delta t)^k}{k!} f^{(k)}(t) \quad (3.2)$$

이므로, $\ddot{x}_{t+\Delta t}$ 및 $x_{t+\Delta t}$ 를 Taylor 전개하면

$$\begin{aligned} \dot{x}_{t+\Delta t} &= \dot{x}_t + (\Delta t) \ddot{x}_t + \frac{1}{2}(\Delta t)^2 \dot{\ddot{x}}_t + \dots \\ x_{t+\Delta t} &= x_t + (\Delta t) \dot{x}_t + \frac{1}{2}(\Delta t)^2 \ddot{x}_t + \frac{1}{6}(\Delta t)^3 \dot{\ddot{x}}_t + \dots \end{aligned} \quad (3.3)$$

이 된다. 여기서 시간 Δt 동안 가속도가 직선적으로 변한다면,

$$\dot{\ddot{x}}_t = \frac{\ddot{x}_{t+\Delta t} - \ddot{x}_t}{\Delta t} \quad (3.4)$$

가 되고 4차 이상의 도함수는 모두 0이 된다. 그러므로

$$\begin{aligned} \dot{x}_{t+\Delta t} &= \dot{x}_t + \frac{(\Delta t)}{2} \ddot{x}_t + \frac{(\Delta t)}{2} \dot{\ddot{x}}_t \\ x_{t+\Delta t} &= x_t + (\Delta t) \dot{x}_t + \frac{(\Delta t)^2}{3} \ddot{x}_t + \frac{(\Delta t)^2}{6} \dot{\ddot{x}}_t \end{aligned} \quad (3.5)$$

이 되며, 여기서 진동속도 및 변위의 초기치는

$$\begin{aligned} \dot{x}_{t=0} &= \ddot{x}_{t=0}\Delta t \\ x_{t=0} &= \frac{1}{2} \ddot{x}_t (\Delta t)^2 \end{aligned} \quad (3.6)$$

이 된다. 이와 같이 나타낸 속도와 변위는 그림 7과 같다.

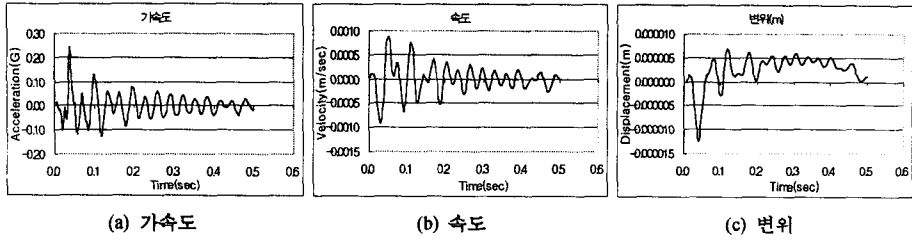


그림 7 직접적분법에 의한 속도와 변위(CASE1)

진동 발생시 슬래브의 유효모드질량은 슬래브의 형태, 보와 슬래브의 강성차에 의해 유효폭과 길이를 산정할 수 있다. 그러나 계산에 필요한 합성데크 슬래브의 탄성계수와 단면모멘트, 보와 슬래브의 강성비 등이 명확하지 않으며, 합성데크 슬래브는 형강보에 스티드 볼트로 접합되어 있음에도 불구하고 일반적인 구조문제에서는 단순지지로 가정한다. 그러므로 본 연구에서는 합성슬래브의 단변을 단순지지로 가정한다. 단순지지원 바닥의 유효모드 질량은 $1/4mWL$ 이고, 여기서 m 은 바닥의 단위면적당 질량, W 는 슬래브의 폭, L 은 슬래브의 길이이다.

슬래브의 감쇠비 ξ 는 Open Plan이나, 가구가 잘 갖추어진 경우 3%정도이고, 마감이 거의 없는 바닥판이나 합성데크로 된 가구가 없는 바닥판의 경우 1.5%보다 낮은 것으로 발표되었다.) 그러나 본 연구에서 주파수 분석을 통해 개략적으로 계산한 결과 1.5%~2.5%로 나타났으므로, 2%로 가정하였다.

위에서 산정한 변수들을 운동방정식에 적용하여 하중을 산정하였다. 하중은 변위와 속도의 값이 매우 적게 나타나 가속도 곡선과 유사한 형태로 나타났다. 하중은 80kg의 사람이 보행할 경우에 132kg에서 68kg의 범위로 변화가 일어났으며, 순간최대하중은 몸무게의 65%가 증가한 값으로 나타났다.

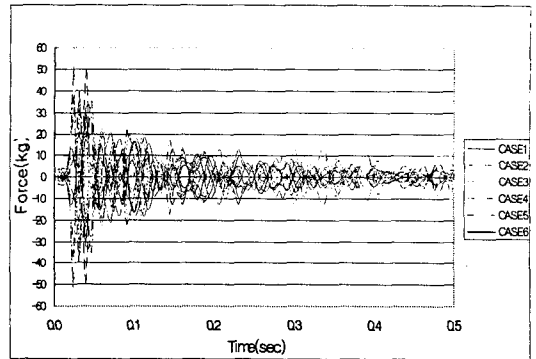


그림 8 각 CASE별 하중

4. 보행하중식 구성

사람이 보행을 할 때 바닥판에 가해지는 하중은 불규칙적인 형태를 가진 주기함수로 나타난다. 이러한 주기함수는 조화함수에 의한 표현이 필수적이며, N번째항까지 고려할 때 식(4.1)과 같이 표현된다.

$$F(t) = P + \sum_{i=1}^N \Delta_i P \sin(2\pi\omega t + \phi_i) \quad (4.1)$$

1) 문용민, 조정민(1996), '바닥구조의 진동', 한국강구조학회지, 제8권4호, pp4-5

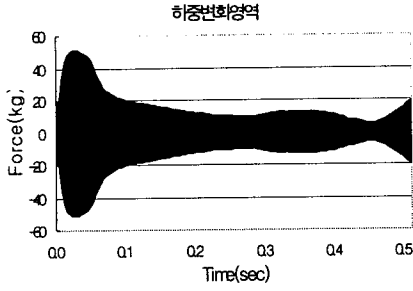


그림 9 보행시 하중의 변화영역

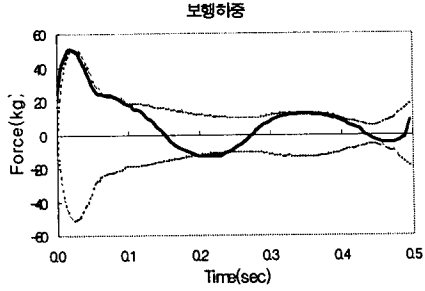


그림 10 보행하중 곡선

여기서 F 는 보행하는 사람의 몸무게이며 Δ 는 Fourier 함수의 계수, ϕ 는 위상각이다. 본 연구에서는 응답가속도로부터 산정한 각각의 하중 모두 포함할 수 있는 하중곡선에 대해 Fourier 계수와 위상각을 구하는 방법으로 진행된다.

먼저 모든 CASE를 고려할 때 하중이 변화하는 범위는 그림 8에 나타난 것과 같다. 이러한 영역을 포함하는 곡선으로 그림 9와 같이 나타낼 수 있다. 위에서 나타난 곡선에 대해 30차까지의 Fourier계수와 위상각을 구한 결과는 표 3, 그림 10,11과 같이 나타난다.

표 3 Fourier 계수와 위상

차수	Fourier 함수의 계수	위상각	차수	Fourier 함수의 계수	위상각	차수	Fourier 함수의 계수	위상각
1	0.194	65.548°	11	0.119	-36.753°	21	0.003	-53.515°
2	0.178	-16.993°	12	0.012	-30.072°	22	0.003	-83.636°
3	0.079	20.411°	13	0.009	-29.174°	23	0.002	-71.413°
4	0.078	0.719°	14	0.011	-47.891°	24	0.003	84.579°
5	0.069	-9.828°	15	0.007	-55.620°	25	0.002	-83.636°
6	0.036	-42.562°	16	0.007	-75.493°	26	0.002	-71.431°
7	0.259	-36.246°	17	0.006	-62.153°	27	0.001	-86744°
8	0.178	-37.969°	18	0.004	88.640°	28	0.001	-71.566°
9	0.170	-57.425°	19	0.004	-60.136°	29	0.001	79.315°
10	0.010	-36.753°	20	0.002	-43.740°	30	0.001	51.945°

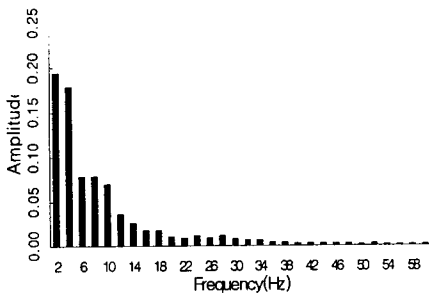


그림 11 Fourier 계수

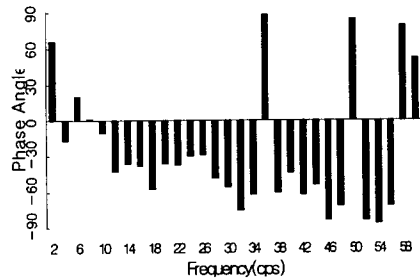


그림 12 Phase Angle

여기에서 나타난 계수와 위상각을 3, 5, 6, 7, 10, 30차까지 적용하여 나타낸 각각의 하중곡선들은 다음과 같다.

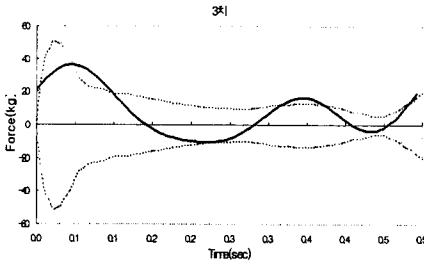


그림 13 3번째 조화

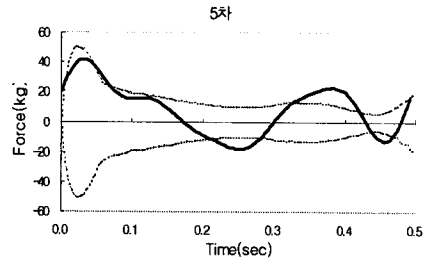


그림 14 5번째 조화

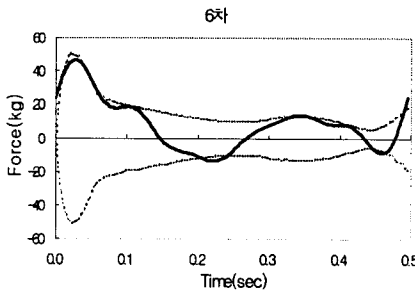


그림 15 6번째 조화

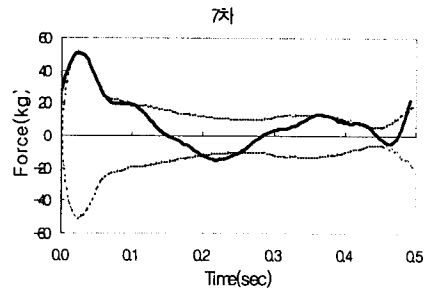


그림 16 7번째 조화

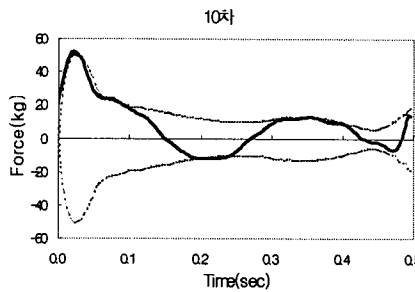


그림 17 10번째 조화

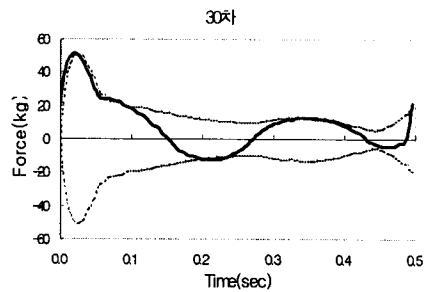


그림 18 30번째 조화

위의 그림에서 5차까지 적용한 하중곡선에서 부터 구하고자 한 하중곡선과 유사한 형태를 나타내며, 7차에서부터는 적용한 하중곡선부터는 보행시 하중이 변화하는 범위를 최대치까지 적절하게 포함하는 것으로 나타난다. 그러므로 7차 이상의 계수와 위상각을 고려하여 하중식을 구성하는 것이 적당한 것으로 판단되며 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$F(t) = P + \sum_{n=1}^7 \Delta_n \sin(n2\pi ft + \phi_n) \quad (4.2)$$

여기서 F 는 사람의 몸무게(kg)이며 f 는 보행 진동수(Hz)이다. 각각의 계수 Δ 와 상대위상각 ϕ 는 표 4와 같다.

표 4 진폭계수와 위상각

조화(n)	Δ_n	ϕ_n
1	0.194	0
2	0.179	-0.50
3	0.079	-0.18
4	0.078	-0.47
5	0.069	-0.72
6	0.036	-1.22
7	0.023	-1.49

5. 결론

본 연구에서는 합성데크를 사용한 바닥판의 고유진동수를 측정하고 사람의 보행으로 인한 응답가속도를 측정함으로써, 기존의 진동이론을 적용하여 사람의 보행시 바닥판에 가진되는 동적하중에 대한 이론식을 작성하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 합성데크를 사용한 바닥판에서 고유진동수를 측정된 결과 대부분의 경우 일본의 기준치인 15Hz보다 낮게 나타났다.
2. 사람의 보행에 의해 바닥판에 가해지는 동적하중은 기본진동수의 정수배로 나타나는 지배적인 진동수에 의한 조화함수로 나타낼 수 있으며, 7차까지의 조화를 고려하는 것이 바람직하다.
3. 보행에 의한 최대하중은 몸무게의 65%정도 증가한 값으로 나타났다.

구조물의 진동과 공해진동에 대한 최근의 경향을 고려할 때, 진동에 대한 사용성 기준의 마련이 시급한 것으로 사료된다. 이를 위해 우선적으로 구조물에 진동을 발생시키는 진동원에 대한 체계적인 연구가 이루어져 사용성평가를 위한 도구가 마련되어야 할 것이며, 이를 바탕으로 방진에 대한 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Hugo Bachmann, Walter Ammann(1987),"Vibrations in Structures - Induced by Man and Machines",IABSE-AIPC-IVBH,pp13-42.
2. Anil K. Chopra(1995),"Dynamics of Structures",Prentice Hall,pp61-118
3. 박노길 외 공역(1994), "기계진동학",반도출판사,pp138-242
4. 차일환 옥정일 공저(1995), "소음진동공학",문운당,pp129-185