

아파트 슬래브의 진동평가에 관한 연구

A Study on Vibration Analysis for the Slab of Apartment Building

박 강 근* · 김 용 태** · 최 영 화***

Park, Kang-Geun · Kim, Yong-Tae · Choi, Young-Wha

ABSTRACT

In these days the floor vibration is beginning to make its appearance of the environmental dispute in apartment building. Standard floor system are suggested for the settlement of this issue by government. The sound of floor impact sound is needed to secure comfortable quality in housing. Also, it is required an accurate analysis and a proper evaluation for floor vibration. Refine model is necessary for the floor system of housing to analyze accurately the floor vibration. But this refine model is not efficient because it is required so much running time for vibration analysis and it is difficult of modeling of standard floor slab. In this paper, new modeling methods of standard floor slab are proposed for the accurate rigidity evaluation. By using the new modeling method, the accurate vibration response can be obtained and can accurately evaluate the rigidity of standard floor system with resilient materials. Therefore the proposed modeling method is of practical use for vibration analysis of floor system of apartment building.

Keywords : Apartment building, Floor vibration, Vibration analysis, Rigidity evaluation

1. 서 론

현대의 건축물은 구조시스템 및 설계기법의 발달과 시공기술의 발전으로 구조물의 장경간화가 가능해졌다. 그리고 강성에 비하여 높은 강도를 갖는 자재의 개발로 구조부재가 경량화, 유연화되어 건축 구조물의 고유 진동수가 낮아지고 있다. 또한 구조물의 용도에 따라서 넓은 공간이 요구되는 건축물은 칸막이벽과 같은 비 구조재의 사용이 감소하고 이로 인하여 구조물의 감쇠효과가 줄어들고 있다.

구조부재를 강도에 맞추어 설계할 경우에는 최근 고강도 재료의 사용으로 구조부재의 크기나 단면적이 작아져서 처짐과 진동이 과도하게 발생하는 경우가 많아 건축물의 사용성을 확보하기 위하여 구조부재의 처짐 및 진동을 허용치 이하로 설계해야 한다. 그리고 거주자들의 환경에 대한 인식의 변화로 진동 및 소음이 중요한 환경문제로 대두되고 있으며 진동은 건축물의 사용성과 안전성에 많은 영향을 미치게 된다. 따라서 건축물의 사용성과 안전성을 평가를 위하여 처짐과 진동에 대한 정확한 해석이 요구되고 있다.

* 부산대학교 산업건축과 교수 E-mail: sampgk@mnu.ac.kr

** 부산대학교 산업건축과 교수

*** 대구대학교 건축공학과 교수

본 연구에서는 사람의 움직임에 의하여 발생하는 동적하중을 로드셀을 이용하여 계측하고 분석하고 보행 하중의 적용방법을 고찰하고자한다. 또한 사람의 움직임에 의한 바닥판 구조물의 효율적인 진동해석을 위한 바닥판 구조물의 실용적인 모형화방법을 제안하고자한다.

2. 진동평가 기준

2.1 인지도 평가기준

국내에서는 1999년 1월 25일에 개정된 ‘소음 진동 규제법 시행규칙’을 기준으로 삼고 있다. 그리고 강구조 한계상태 설계 규준에서 ‘CEN Euro code 3 part 1’과 ‘Allen & Murray의 보행진동에 대한 설계’를 적용하고 있으며 합성데크 바닥구조 설계기준에서는 바닥판의 고유진동수를 15Hz이상으로 제안하고 있다.

국외에서는 미국, 캐나다, 일본, 독일 등에서 각각 독자적인 진동 기준치를 제안하고 있다. 구조물의 진동에 대한 검토에는 주로 ‘Constant comfort curves by Reiher and Meister’, ‘Goldman chart’, ‘Modified Reiher-Meister scale by Lenzen’, ‘Allen’s recommended acceleration limits for vibrations’ 등이 사용되고 있다. 특히, 북미에서는 ‘Modified Reiher -Meister scale’, ‘Canadian Standard Association’ 그리고 ‘Murry criterion’ 등이 사용되고 있다. 각국의 기준치 별로 제안하고 있는 방식은 약간씩 다르지만 인체가 느끼는 실제의 감각에 기초한 진동의 수준을 평가하고 있다는 점에서는 동일하다.

사람이 과도한 진동에 노출되면 심리적 불안감을 초래하거나 시계가 흐려지고 집중력을 잃게 되는 등 근무환경에 많은 영향을 받을 수 있으며, 경우에 따라서 정신적 스트레스로 인하여 심각한 결과가 초래할 수도 있다. 인지도 평가기준은 인지정도에 따른 단계별로 진동레벨을 제시하여 진동에 대한 사람의 인지도 평가에 활용되고 있다.

표 2-1 제안자/단체별 진동레벨

제안자/단체	진동레벨(dB, v=mm/sec, vref=1mm/s)	
	인식레벨	불쾌감 인지레벨
Reiher & Meister	90 ($V_p=0.3\text{mm/s}$)	112
Dieckmann	82 ($V_p=0.125\text{mm/s}$)	122
DIN 4150	82 ($V_p=0.125\text{mm/s}$)	102
Bachmann & Amman	60 ($a_p=40.0\text{mm/s}^2$, $V_p=0.64\text{mm/s}$)	100

표 2-2 Bachmann & Amman

지각 정도	가속도(mm/s^2)	속도(mm/s)
	1~10 Hz	10 ~ 100 Hz
지각하지 못함	10 (60dB)	0.16 (82dB)
약간 지각	40 (72dB)	0.64 (96dB)
확실히 지각	125 (81dB)	2.00 (106dB)
짜증을 일으킴	400 (92dB)	6.40 (116dB)
불쾌하고 지속되면 고통스러움	1000 (100dB)	16.00 (124dB)

2.2 구조물 평가 기준

일반적으로 수진구조물의 손상을 고려한 허용진동기준은 구조적으로 진동에 매우 취약한 건물(낮은 가속 등)이나, 문화재 같이 장기적인 진동 피로 효과를 감안하여 극단적인 진동피해 방지를 고려해야 하는 경우가 아니라면 별도의 허용진동 기준을 적용하지 않는 것이 보통이다. 특히 현대적인 설계·시공·기법으로 축조된 건물의 경우 기계진동에 의한 구조적 손상 피해 발생 가능성은 대체로 적다.

표 2-3 DIN 4150 (1986)-정상진동

건물 등급	I	II	III
건물의 형식	상업용 및 산업용 건축물	주거용 건축물	진동에 예민한 구조물
	사무실 및 공장 건축물	연립 및 단독주택, 아파트	문화재 및 중요구조물
허용 진동속도	5mm/s 이하	5mm/s 이하	-

표 2-4 Swiss Standard for Vibration Damage to Buildings (1981)

Building Class	Frequency range	Maximum resultant velocity, v_i (mm/sec)	Estimated maximum vertical velocity v_{max} (mm/sec)
· Industrial buildings of reinforced concrete, steel construction	10~30	12	7.2~12
· Buildings on concrete foundation. Concrete wall or brick wall	30~60	12~18	7.2~18
· Buildings with brick cellar walls. Upper apartment floors on wooden beams	10~30	8	4.8~8
· Especially sensitive buildings and historical buildings	30~60	8~12	4.8~12
	10~30	5	3~5
	30~60	5~8	3~8
	10~30	3	1.8~3
	30~60	3~5	1.8~5

3. 구조물의 진동해석을 위한 보행하중의 적용방법

3.1 공동주택의 충격원

바닥판 구조물에 보행하중을 적용하는 방법 중에 하나는 바닥판을 분할하여 생성된 절점에 시간지연을 갖는 절점 보행하중을 가하는 것이다. 시간지연을 갖는 절점 보행하중은 요소 내에 작용하는 것이 아니라 절점에 가해진다. 시간지연을 갖는 절점 보행하중의 적용방법은 그림 3-1와 같이 해석모델을 보폭에 맞게 분할하고 연속되어 있는 절점에 순차적으로 가하는 것이다.

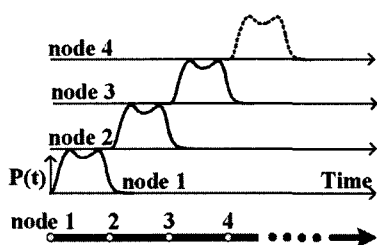


그림 3-1 시간지연 절점 보행하중

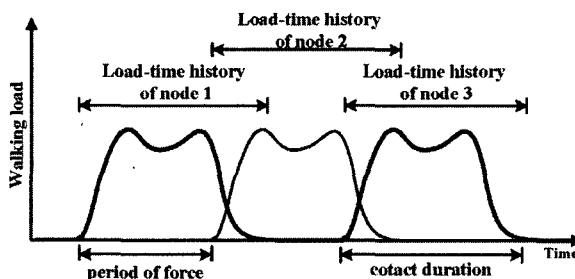


그림 3-2 절점 보행하중

공동주택에서의 소음과 진동을 유발시키는 원인으로는 거주자의 움직임과 배수관 유체의 흐름에 의한 것이 대부분이다. 거주자의 움직임에 의한 진동원은 구두를 신은 여성의 보행, 주화/수저의 낙하소리와 같은 경량충격원과 어린이의 뛰는 행동과 같은 중량충격원으로 구분되어 진다. 본 논문에서는 경량 충격하중으로 그림 3-3과 같이 55kgf의 보행자에 의한 보행하중을 적용하였으며 그리고 중량 충격하중으로는 그림 3-4와 같이 뒤꿈치 충격하중을 적용하였다.

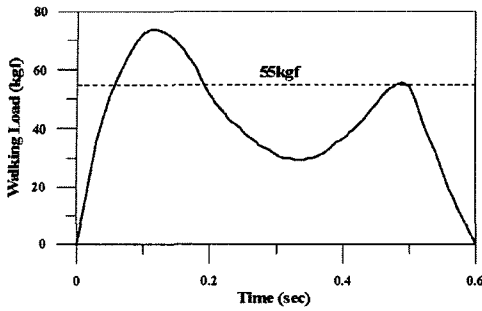


그림 3-3 보행 하중

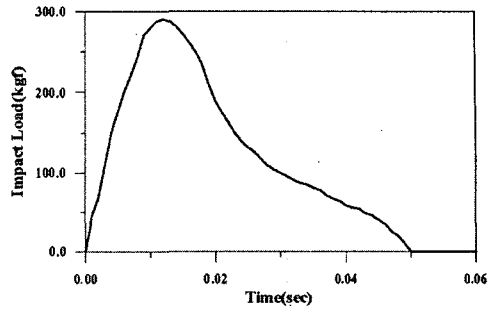


그림 3-4 충격 하중

3.2 아파트 슬래브의 상세

실무에서는 바닥판 구조물의 해석에 있어서 바닥판 구조물의 단면은 상세하게 모형화해 해석을 수행하기가 쉽지 않기 때문에 콘크리트 슬래브만을 모형화하여 해석을 수행하는 경우가 대부분이다. 따라서 엔지니어가 수행하는 일반적인 해석에 의한 응답과 실제 응답에서 차이가 나타난다.

정적해석 예제의 표준바닥구조를 구성하고 있는 재료의 특성은 표 3-1와 같다. 콘크리트 슬래브와 마감모르티는 보통강도 콘크리트를 적용하였으며 완충재는 발포 폴리스티렌계열의 완충재를 적용하였다. 그리고 경량기포 콘크리트는 경량 콘크리트를 적용하였다. 완충재는 계열에 따라서 재료적 특성이 다르게 나타나고 있으나 KS에서 규정한 값으로 적용하였다.¹⁾

표 3-1 표준바닥판 구조물의 구성재료

재료	탄성계수(kgf/cm ³)	프와송비	밀도(kg/m ³)
콘크리트 슬래브	2.3E09	0.167	2,400
완충재	4.0E00	-	15
경량기포 콘크리트	1.8E09	0.167	1,500
마감 모르터	2.3E09	0.167	2,400

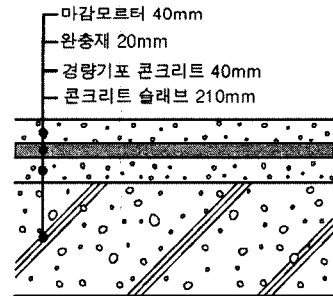


그림 3-5 진동해석 단면

4. 아파트 슬래브의 실용적인 진동해석

4.1 적층판이론에 의한 표준바닥판 구조물의 강성평가

적층판은 일련의 판들이 축에 대하여 적당한 각도를 이루며 일체화된 경우를 말하며 이러한 적층판을 해석하기 위해서는 적층판 이론이 도입되어야 한다. 본 절에서는 적층판 이론을 도입한 표준바닥판 구조물의 강성평가식을 간단히 소개하고자 한다.^{4),5),6)}

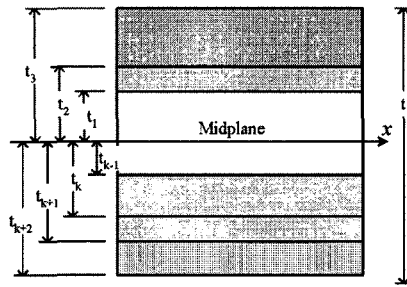


그림 4-1 적층판 구조물

그림 4-1과 같이 다층으로 이루어진 적층판에 대한 k 층에 대한 변형도-변위 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k = -z [D^*]_k \begin{Bmatrix} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} = z [D^*]_k \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1) \quad D^* = \begin{bmatrix} D_{11}^* & D_{12}^* & D_{13}^* \\ D_{12}^* & D_{22}^* & D_{23}^* \\ D_{13}^* & D_{23}^* & D_{33}^* \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, w 는 판의 연직방향 처짐이며 적층 강성매트릭스 D_{ij}^* ($i, j = 1, 2, 3$)는 전환매트릭스 $[T]$ 를 이용하여 다음과 같이 얻어진다.

$$D_{11}^* = E_x \cos^4 \alpha + E_y \sin^4 \alpha + (2E_{xy} + 2G) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha \quad (3-1)$$

$$D_{22}^* = E_x \sin^4 \alpha + E_y \cos^4 \alpha + (2E_{xy} + 2G) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha \quad (3-2)$$

$$D_{12}^* = (E_x + E_y - 4G) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha + E_x E_y (\sin^4 \alpha + \cos^4 \alpha) \quad (3-3)$$

$$D_{33}^* = (E_x + E_y - 2E_x E_y - 2G) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha + G(\sin^4 \alpha + \cos^4 \alpha) \quad (3-4)$$

$$D_{13}^* = (E_x - E_y - 2G) \sin \alpha \cos^3 \alpha - (E_y - E_{xy} - 2G) \sin^3 \alpha \cos \alpha \quad (3-5)$$

$$D_{23}^* = (E_x - E_y - 2G) \sin^3 \alpha \cos \alpha - (E_y - E_{xy} - 2G) \sin \alpha \cos^3 \alpha \quad (3-6)$$

여기서, E_x, E_y 는 적층되는 각 개개의 판들이 주어지는 기준 축과 임의각도를 이룰 때의 재료 상수를 의미한다. 적층되어지는 개개의 판들이 축에 대하여 직교를 이루며 일체화되었다고 가정하는 경우, 식 (10)에서 α 가 90° 를 이루므로 강성식이 간단하게 전개된다. 그리고 D_{13}^* 과 D_{23}^* 이 다른 식에 대하여 종속하므로 직교이방성 판의 강성은 $D_{11}^*, D_{22}^*, D_{12}^*$ 그리고 D_{33}^* 에 의하여 결정된다. 각각의 적층판이 직교를 이루는 직교이방성 적층판인 경우에 $D_{13}^* = 0$ 이며 $D_{23}^* = 0$ 이 된다. 적층판의 중앙면에 작용하는 휨모멘트에 대한 층의 강성식은 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N [D_{ij}^*]_k (t_k^3 - t_{k-1}^3) \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (4)$$

k 는 적층판의 수를 의미하며 본 논문에서 적용한 표준바닥구조는 4개의 층으로 구성되어 있다.

그림 4-5은 적층판이론을 적용한 모델(Model-L)의 보행하중에 의한 변위응답과 상세해석 모델(Model-D) 그리고 일반해석 모델(Model-G)의 변위응답을 나타낸 것이다. 적층판이론에 의한 표준바닥판 구조물의 강성이 실제보다 크게 평가되고 있기 때문에 Model-L의 변위응답이 상세해석 모델(Model-D)의 변위응답보다 작은 것을 볼 수 있다. 이는 완충재 층의 탄성계수가 다른 층의 탄성계수에 비하여 매우 작기 때문에 바닥판

의 휨 거동에 있어서 완충재의 상부층과 하부층이 일체화되어 거동하지 않기 때문이다. 이를 해결하기 위해서는 완충재층을 입체요소나 판요소로 모형화하기 보다는 탄성연결체(Elastic Link)로 연결하여 해석하거나 완충재 상부층의 경량기포 콘크리트 또는 마감모르타의 강성을 완충재 하부층의 콘크리트 슬래브의 강성에 추가하여 해석하는 것이 타당할 것이다.

4.2 표준바닥판 구조물의 실용적인 강성평가

그림 4-2와 같이 완충재가 있는 바닥구조의 강성을 다음과 같이 평가한다. 완충재층의 강성은 완충재층의 탄성계수(E_2)가 다른 층의 탄성계수와 비교하여 매우 작기 때문에 무시한다. 그리고 완충재 하부층의 탄성계수(E_3)에 완충재 상부층에 의한 추가 탄성계수(E')를 더하여 완충재가 있는 바닥구조의 탄성계수를 결정한다. 따라서 표준바닥판의 탄성계수는 하부층의 탄성계수(E_3)에 식 (5)와 같은 추가 탄성계수(E')를 더하여 식 (6)와 같이 표현한다.

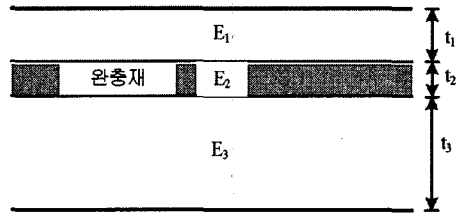


그림 4-2 완충재가 있는 바닥구조 시스템

$$E' = E_1 \left(\frac{t_1}{t_3} \right)^3 \tag{5}$$

$$E = E_3 + E_1 \left(\frac{t_1}{t_3} \right)^3 \tag{6}$$

4.3 보행하중에 의한 실제 아파트 바닥판 구조물의 진동해석

보행하중과 같은 충격원에 의하여 진동과 소음이 가장 크게 발생하는 곳은 거실로 거실은 바닥 면적이 크고 주거인의 활동이 가장 많이 이루어지는 공간이다. 따라서 본 연구에서는 실제 아파트의 거실에서의 보행하중에 의한 진동해석을 수행하였다.

그림 4-3은 40평형 아파트의 거실과 보행경로를 나타낸 것으로 바닥판의 크기는 5.0m×5.8m해석모델의 경계조건은 2변 고정 2변 자유단하였다. 30평형과 50평형의 해석모델은 바닥판의 크기가 각각 4.6m×5.5m와 5.6m×6.1m로 하였으며 보행경로와 경계조건은 그림 4-3의 40평형 모델과 같게 하였다.

그림 4-3은 40평형 거실에서 거주자의 거실 중앙을 가로질러 보행할 때 야기되는 거실 중앙 점A에서의 변위응답을 나타낸 것이다. 그림 4-4과 그림 4-5는 34평형과 56평형 거실에서 거주자가 보행할 때 야기되는 점A에서의 변위응답으로 그림 4-3와 같은 양상의 변위응답을 보여주고 있다.

슬래브만 모형화한 Model-G의 변위응답이 Model-D의 변위응답보다 크게 나타나고 있다. Model-L은 바닥판 강성을 과다하게 고려하기 때문에 변위응답이 Model-D의 변위응답보다 작게 나타나고 있다. 본 연구에서 제안한 Model-P의 변위응답이 Model-D의 변위응답에 가장 근접한 것을 볼 수 있다.

4.4 무리보행에 의한 실제 아파트 바닥판 구조물의 진동해석

무리에 의한 보행은 한 사람에 의한 보행보다 바닥판에 가해지는 동적하중이 크므로 과도한 진동을 유발시킬 가능성이 한층 더 높으며 이로 인하여 바닥판 구조물의 사용성에 보다 심각한 영향을 줄 수 있을 것이다. 그러므로 무리에 의한 보행하중을 효율적으로 적용하는 방법이 필요하다.

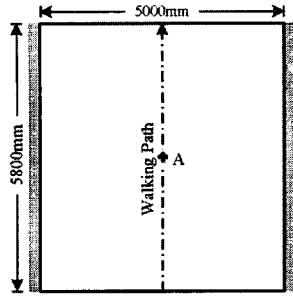


그림 4-3 보행경로(40평형 거실)

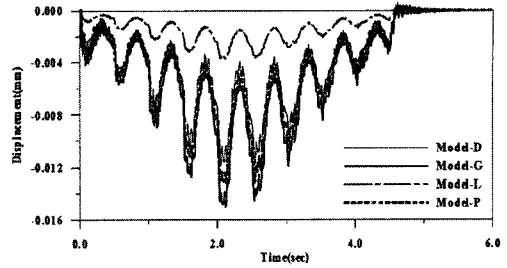


그림 4-4 40평형대 바닥판 구조물의 변위응답

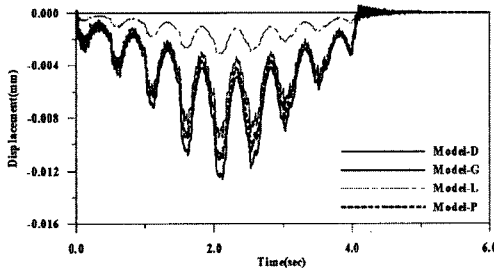


그림 4-5 30평형대 바닥판 구조물의 변위응답

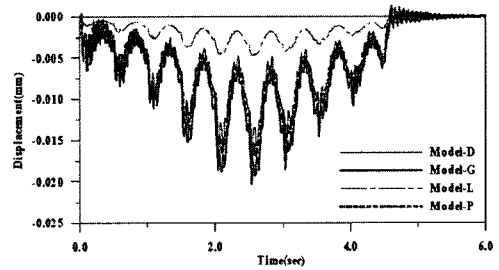


그림 4-6 50평형대 바닥판 구조물의 변위응답

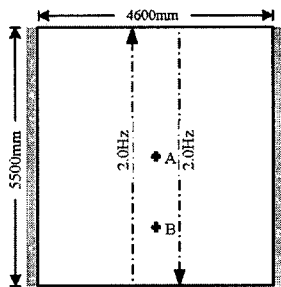


그림 4-7 반대방향 보행(30평형 거실)

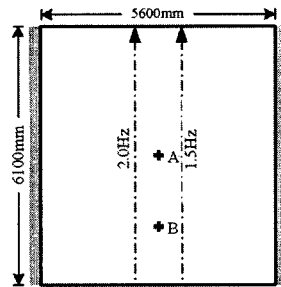


그림 4-8 같은방향 보행(50평형 거실)

무리에 의한 보행의 특징은 보행자의 보행방향과 보행진동수가 다양하게 나타날 수 있다는 것이다. 본 연구에서는 무리 보행의 가장 기본적인 적용방법으로 두 보행자가 반대 방향으로 같은 보행속도로 보행할 때와 같은 방향으로 다른 보행속도로 보행할 때 야기되는 예제 구조물의 변위응답을 분석하였다.

그림 4-7은 30평형 거실에서 보행자-A가 Walking path-A를 따라서 2.0Hz의 보행진동수로 위에서 아래로 보행하고 그리고 보행자-B가 2.0Hz의 보행진동수로 Walking path-B를 따라서 아래서 위로 서로 반대 방향으로 각각 보행할 때 야기되는 30평형 거실의 점 B에서의 변위응답을 나타내었다. 보행자-A와 보행자-B가 점 B를 지나가는 시간대역인 1.0초와 3.0초 에서 응답이 크게 나타나고 있으나 전체적으로 같은 변위응답을 보여주고 있다. 그림 4-10은 보행자-A가 2.0Hz의 보행진동수로 보행자-B가 1.5Hz의 보행진동수로 같은 방

향으로 보행할 때 야기되는 50평형 거실의 점A에서의 변위응답을 나타낸 것이다. 보행자-A는 2.1초 시간대역에서 그리고 보행자-B는 3.0초 시간대역에서 점 A를 지나가므로 이 시간대에서 응답이 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

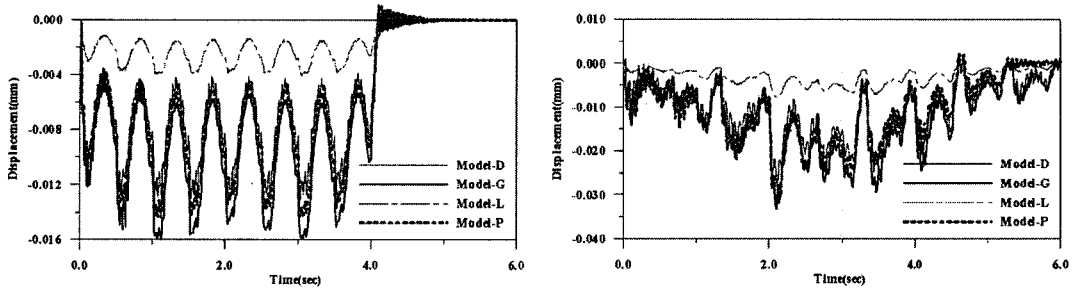


그림 4-9 반대방향 보행에 의한 점B의 변위응답(30평형 거실) 그림 4-10 방향 보행에 의한 점A의 변위응답(50평형 거실)

5. 결론

본 논문에서는 아파트 슬래브에 대한 실용적인 강성평가 방법에 대하여 소개하였으며 그리고 모형화 방법에 따른 예제 구조물의 진동해석을 통하여 다음과 같은 결론은 얻을 수 있었다. 실무에서 구조물을 상세하게 모형화하여 진동해석을 수행하는 것은 현실적으로 어려우므로 이에 대한 대안으로 본 논문에서 표준바닥구조판 구조물의 새로운 모형화 방법을 제안하였다. 본 논문에서 제시한 표준바닥판 구조물의 모형화 방법에 의한 진동응답이 다른 모형화 방법의 진동응답과 비교하여 보다 정확한 진동응답을 얻을 수 있다. 또한 이 방법은 아파트 슬래브의 모형화 과정에 있어서도 간단한 계산식을 이용하여 완충계층이 있는 표준바닥구조를 고려할 수 있으므로 실무에서 매우 실용적으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 본 논문에서는 수치해석에 국한하여 연구를 수행하였으나 표준바닥구조에 대한 정확한 진동평가를 위해서는 이에 대한 실험과 진동계측이 있어야 하며 이에 대한 연구도 함께 수반되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 양관섭 (2004) 공동주택 바닥충격음의 기준 및 운영방안, **대한실비공학회 기력기사**, 33(9), pp.30~35.
2. 김하근, 김명준, 이병권 (2005) 뜬 바닥구조용 완충재의 동탄성계수 측정에 관한 연구, **대한건축학회 논문집**, 21(1), pp.229~234.
3. 김기철 (2005) 테크 바닥판 구조물의 실용적인 진동해석, **한국전산구조공학회 논문집**, 18(1), pp.61~69.
4. Reiner, W., Meister F.J. (1946) The Effect of Vibration on People, Report, F-TS-616_RE, **Headquarters Air Material Command, Wright Field, OH**
5. Goldman, D.E. (1948) United States Navy MRI, Report, no. NM 004 001, March
6. Lenzen, K. H (1966) Vibration of Steel Joist Concrete Slab Floors, **Engineering Journal, AISC** 3(3)
7. Ohmart, R. D. (1968) An Approximate Method for The Response of Stiffened Plates to A Periodic Excitation on Studies in Engineering Mechanics, Report No. 30, **The University of Kansas, Center for Research in Engineering Science, Lawrence, Kansas**
8. Galbraith, F.W. and Barton, M.V. (1970) Ground Loading from Footsteps, **The Journal of Acoustical Society of America**, Vol.48 (5), pp.1288~1292
9. Bruce Ellingwood, and Andrew Tallin (1984) Structural Serviceability: Floor Vibration, **ASCE**, Vol. 110, No. 2, pp 401~417.