철근콘크리트 슬래브의 진동 특성

VIBRATION CHARACTERISTICS OF REINFORCED CONCRETE SLABS

변 근 주 *, °노 병 철 **, 방 춘 석 ***, 이 호 범****
Byun, Keun-Joo, Lho, Byeong-Cheol, Bang, Chun-Suk, Lee, Ho-Beom

ABSTRACT

Some aspects of the design procedures of reinforced concrete slabs concerning microvibration behavior have to be considered. In this study, a numerical algorithm for the analysis of slabs to withstand the microvibration effects is developed.

First, the evaluation criteria for controlling the microvibration of slabs is given from the literature survey. Second, the human-induced load model is developed by the experimental results. Finally, the procedure for the analysis of reinforced concrete slabs, with particular emphasis to the slab subject to human-induced dynamic load, is developed by the finite element method and is then examined by using the slab model tests. In addition, the effects of elastic modulus, mass, shape of slab, and support conditions on the microvibration behavior of reinforced concrete slabs are analyzed.

It is concluded that the developed analysis procedure shows in accecptable accuracy compared with the experiments and the analysis procedure can be easily applied to the practical microvibration problems.

1. 서론

최근 고품질의 건설재료 개발과 구조물의 설계·해석기법이 크게 향상됨에 따라 구조물은 기존의 내하력 이외에도 사용성, 기능성 및 내구성을 요구하고 있다. 특히 구조물의 해석 및 설계를 위한 고성능 컴퓨터의 사용이 일반화되고, 구조거동의 평가를 위한 고정밀 계측기의 개발에 힘입어 대상구조에 따라서는 매우 엄밀한 설계기준이 적용되고 있는 실정이다[1]. 예를 들면 반도체, 광학기기 및 초정밀기기 제조공장의 건물구조, 원자력발전소의 격납구조등에서는 구조물의 기능적인 요구를 만족하기 위하여 사용하중하에서 발생하는 처짐, 속도 및 가속도등의 동적응답정도를 일반 구조물의 허용범위 이하로 크게 제한하고 있다[2].

* 정회원 연세대학교 토목공학과 교 수
** 정회원 연세대학교 토목공학과 박사과정
*** 정회원 연세대학교 토목공학과 석사과정
**** 정회원 삼성종합건설연구소 선임연구원

대부분의 토목구조물은 진동하중을 받고 있고, 이의 발생원인 또한 매우 다양하므로 구조물의 동적거동은 매우 복잡한 양상을 보이는 경우가 많다. 또한 구조물에 전달된 진동하중은 구성재료의 강성, 구조의 종류, 구조의 기하형상, 지반과 구조물의 상호작용, 기초지반의 물성등에 따라서 간섭 또는 중첩되기도 하고, 진동모드나 진동파의 전달이 매우 다양한 경로를 통하여 이루어지므로 구조물의 동적거동을 합리적으로 평가하기는 용이하지 않다. 일반적으로 인간의 활동으로 인하여 유발되는 가진력은 간과되는 경향이 있으나, 실제로 반도체공장내의 청정실, 스포츠센터, 콘서트홀의 발코니, 다이빙대 및 정밀방진을 목적으로 하는 구조물등에서의 가장 큰 가진원은 인간의 활동이다[1][2].

이러한 구조물의 진동문제는 동적해석기법만으로 해결이 되지 않는 경우가 대부분이다. 그러므로 철근콘크리트 슬래브의 실측진동

응답자료와 수치해석에 의한 진동응답의 비교분석을 통하여, 실험을 거치지 않고도 수치해석
에 의한 구조물의 진동응답예측도를 향상시키는 것이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 진동 대책수립의 기초자료가 되는 보행가진력을 모형화하고, 보행가진력과 여러 영향인자들이 철근콘크리트 슬래브구조의 동적 및 진동특성에 미치는 영향을 평가할 수 있는 해석과정을 개발하는데 연구의 목적이 있다.

2. 진동 제어

진동문제에 영향을 주는 인자는 첫째 진동을 발생시키는 진동원, 둘째 진동을 전달하는 전달매체, 셋째 진동피해를 받는 수진체 등의 세가지로 크게 구분할 수 있다[2]. 진동원으로서는 외부진동, 내부진동 및 기타진동이 존재한다. 복잡한 진동문제에 있어서 진동의 원인을 정확히 고찰하고 체계적으로 분류하는 일은 진동실험의 기본자료 및 수치해석기법을 적용하는데 있어서 매우 중요한 사항이다. 따라서 진동의 특성과 원인을 파악하고 그 각각의 요소에 의한 가진력을 산정하는 것이 바람직하다.

또한 진동매체는 일반적으로 형상이 복잡하고 기본특성(물성)이 불명확하므로 실제의 전파매체를 세부적으로 구명하는 것은 매우 어려운 일이다. 본 연구에서는 진동원에서 발생한 진동이 대상구조를 통해 지지점으로 전달되고, 이 진동이 다시 대상구조로 진동되므로, 전파매체는 철근콘크리트 슬래브 및 지지점만을 연구대상으로 제한하였다.

진동 제어의 대상이 되는 수진체는 일반적으로 협진기기가 주 대상이며, 수진체에 작용하는 진동이 협진기기의 허용범위 이하로 되도록 하는 것이 주요 관건이 된다. 따라서 본 연구에서는 진동제어의 결과를 정량적으로 평가할 수 있는 평가기준을 설정할 필요가 있다.

3. 철근콘크리트 슬래브의 진동해석이론

3.1 모드중첩법에 의한 시간력해석

외력이 작용할 경우의 운동방정식을 직접 계산하여 동적해를 구하는 데는 많은 계산량과 그에 따른 컴퓨터 계산시간이 많이 필요하므로 동적해를 효율적으로 구하기 위하여 모드중첩법을 많이 사용하며, 이를 그림 1에 개념적으로 도시하였다.

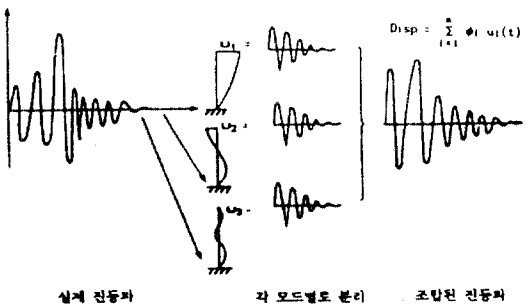


그림 1. 모드중첩법의 개념도

3.2 해석과정

철근콘크리트 슬래브의 동적응답을 구하기 위한 해석과정은 그림 2와 같다.

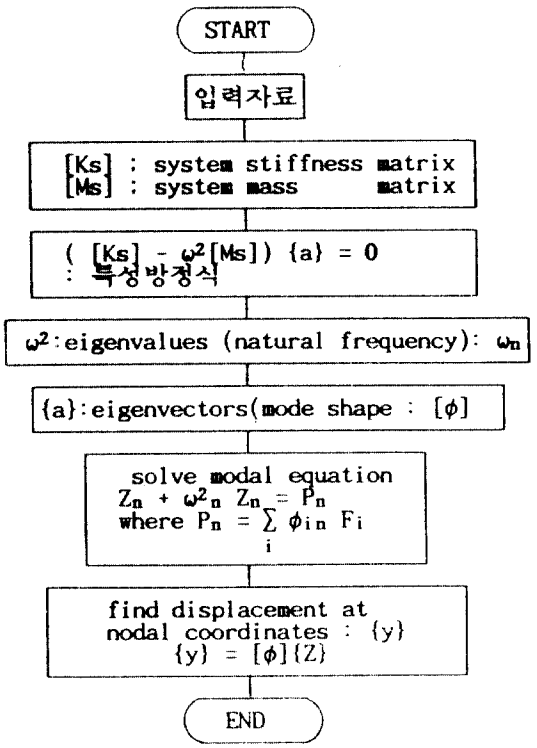


그림 2. R.C.슬래브의 동적해석과정

4. 보행가진력측정 및 R.C.슬래브의 진동실험

4.1 보행가진력 측정기의 제작

사람에 의한 보행가진력측정을 위한 측정기는 그림 3과 같으며, 보행가진력 측정기의 보정 및 출력전압의 선형성(0~80kg 범위)의 검증은 기지의 중량을 이용하여 수행하였다.

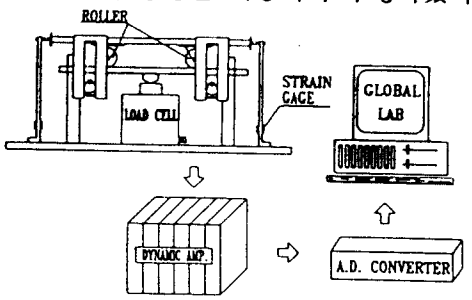
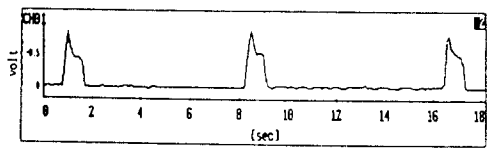


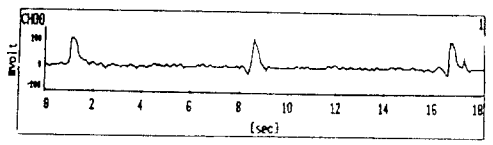
그림 3. 보행가진력 측정기 및 측정장비

4.2 보행가진력 측정 및 모형의 제안

그림 4는 체중이 60kg인 사람이 보행한 경우의 수직방향과 수평방향의 보행가진력을 동시에 측정한 결과를 나타낸 것이며, 그림 5는 그림 4의 출력결과로부터 보행가진력을 모형화한 것이다. 모형화한 보행가진력은 그림 5와 같이 수직하중이 최대 64.10kg으로, 가진시간은 0.9초이며, 수평하중은 최대 1.1kg으로 가진시간은 0.7초이고 수직하중이 가진된 후 약 0.1초의 시간이 경과된 후 가진된다.

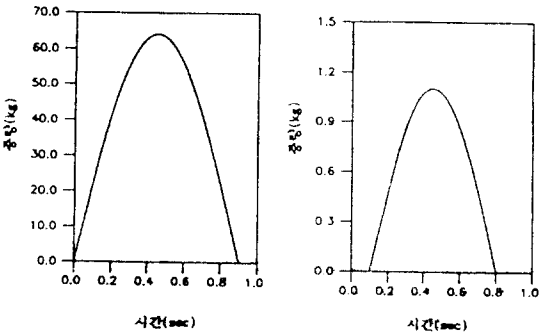


수직방향의 가진력



수평방향의 가진력

그림 4. 수직 및 수평방향의 가진력 출력결과



수직 보행가진력 모형 수평 보행가진력 모형

그림 5. 수직 및 수평 보행가진력 모형

4.3 철근콘크리트 슬래브 제작 및 실험장치

철근콘크리트 슬래브의 제작은 KS F 2404 (현장에서 콘크리트의 압축 및 휨강도용 시험용 공시체를 제작하고 양생하는 방법)에 따라 118cm × 68cm × 6.7cm 의 제원을 갖도록 제작하였다. 철근콘크리트 슬래브의 진동실험을 위하여 사용된 장비 및 측정장비의 구성은 그림 6과 같다.

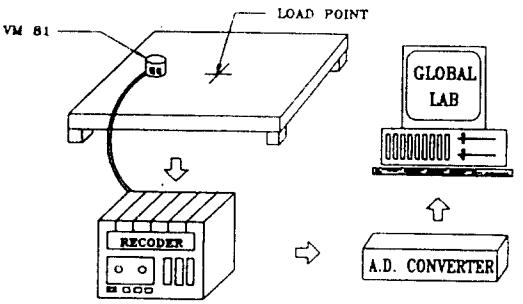


그림 6. 진동실험장비 구성도

5. 수치해석 및 비교분석

5.1 해석 대상 구조의 모형화

그림 7은 철근콘크리트 슬래브의 형상과 이의 수치해석을 위한 요소분할을 나타낸 것으로서 대상구조물을 총 81개의 절점과 64개의 요소로 분할하고, #1, #73을 힌지로 #9, #81을 로울러로 모형화하였다. 또한 #1, #73은 x

및 y방향의 변위와 z방향의 회전을 구속하는 힌지조건으로 하여 강체운동을 억제하였으며, #9, #81은 z방향의 회전만을 구속한 로울러 조건으로 하였다. 가진점(#41)과 PICK-UP의 위치(#39)는 실험과 동일한 조건으로 하였다.

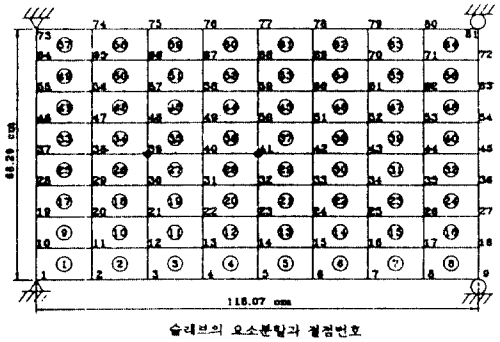


그림 7. 해석 대상구조의 유한요소 모형화

5.2 수치해석결과의 검증

그림 8은 동적 실험을 통하여 체중 60kg의 보행자가 41절점을 보행할 경우의 가속도응답을 VM-81을 사용하여 출력한 결과와 수치해석 결과를 도시한 것으로 수치해석의 예측도가 매우 높음을 나타내고 있다.

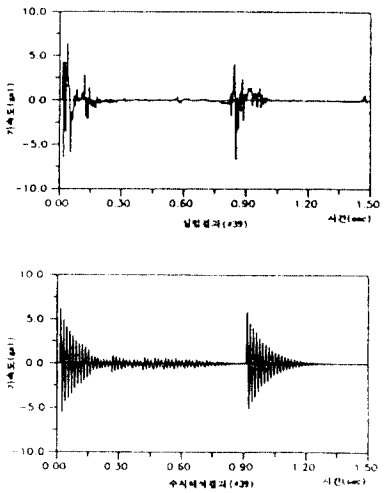


그림 8. 동적실험 및 수치해석 결과(#39)

5.3 사용재료의 변화에 따른 동적거동

사용재료의 탄성계수를 1.95576×10^5 (σ_{ck} :170kg/cm^2)~2.80624×10^5 (σ_{ck}:350kg/cm^2) kg/cm^{2}로 변화시키며 수치해석을 실시하여 그림 9에 나타내었다.

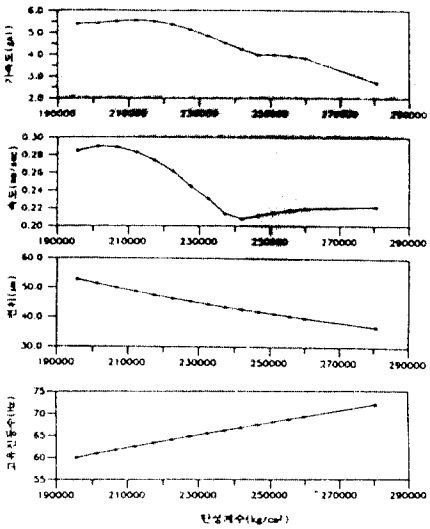


그림 9. 탄성계수변화에 따른 진동특성

5.4 슬래브의 형상비에 따른 동적거동

동일한 단변을 갖는 철근콘크리트 슬래브의 형상비(길이:폭)를 1:1, 1.5:1, 1.735:1 및 2:1로 변화시켰을 경우에 대한 동적거동의 수치해석결과를 그림 10에 나타내었다.

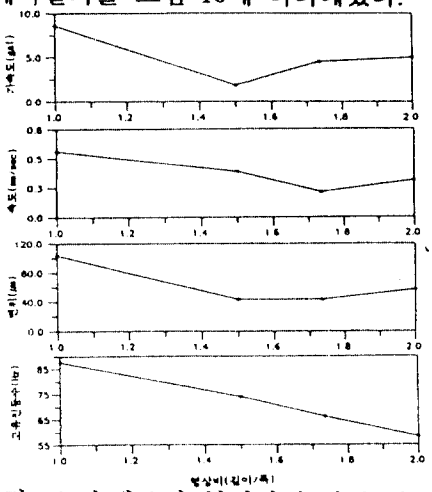


그림 10. 슬래브의 형상비에 따른 진동특성

5.5 슬래브의 질량 변화에 따른 동적거동

슬래브 중앙에서 단변방향(#5와 #77사이)으로 0.0~448.342kg까지의 추가질량을 보 형태로 추가하여, 각 경우에 대한 수치해석결과를 그림 11에 정리하였다.

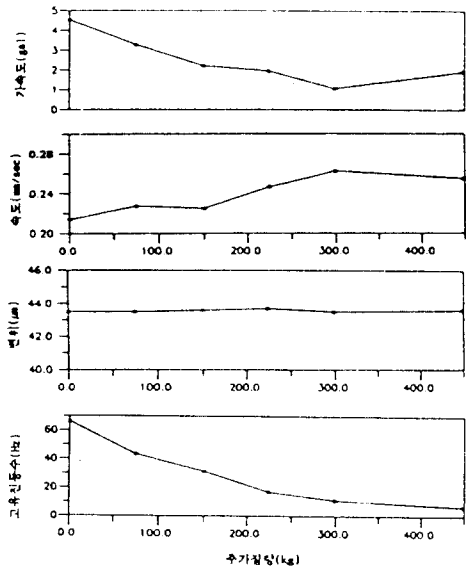


그림 11. 슬래브의 질량변화에 따른 진동특성

5.6 슬래브의 지지조건에 따른 진동특성

대상구조의 방·제진설계시 중요한 인자중에 하나는 지지조건이며, 진동이 전달되는 것을 차단하기위해 방진기구를 설치하는 것이 일반적이다. 따라서 본 절에서는 지지조건을 스프링과 댐퍼로 모형화하여 스프링상수(k) 및 감쇠비(ξ)를 변화시키면서 슬래브내의 임의점(#39)에서의 진동특성을 수치해석하여 구하였다. 그림 12는 감쇠비가 각각 0.0, 0.005 및 0.05일 경우 스프링상수값의 변화에 따른 동적특성을 도시한 것으로 감쇠비에 관계없이 스프링상수값이 200kg/cm이하(방진기구설치시)인 경우 동적특성이 대단히 크며, 500kg/cm이상인 경우 거의 변화가 없음을 나타내고 있다. 이는 철근콘크리트 슬래브의 고유진동수가 스프링상수값의 변화에 따라 그림 5.7과 같이 변화하고 이들 고유진동수중 비교적 보행가진력 진동수와 인접한 경우와 공진현상을 일으킴에 따른 결과로 사료된다.

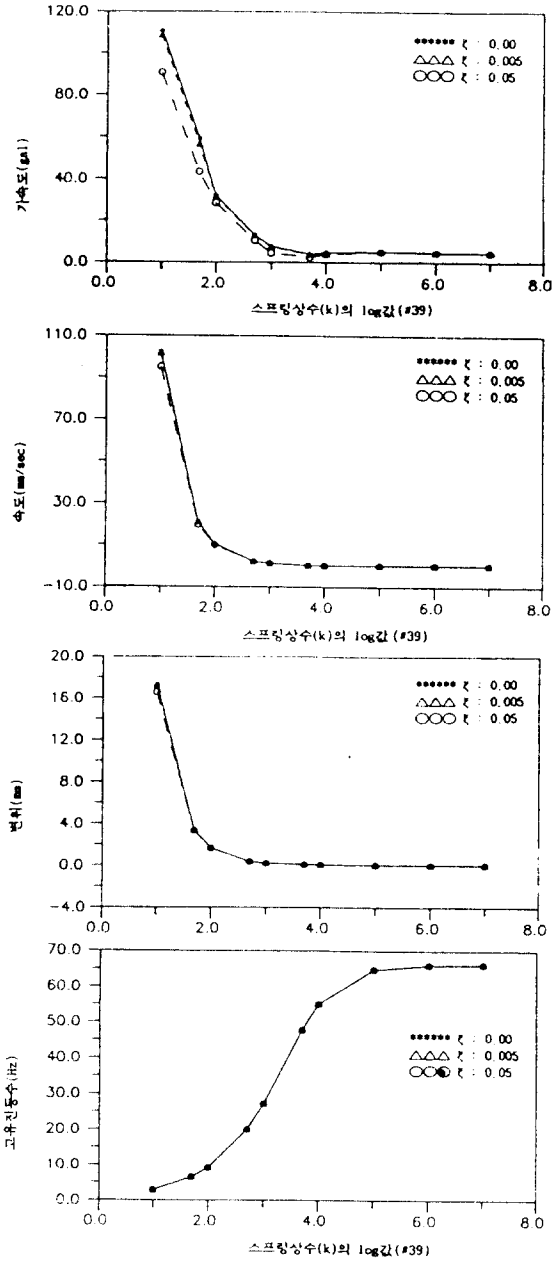


그림 12. 스프링상수(k)와 감쇠비(ξ)의 변화에 따른 진동특성

5.7 슬래브의 거리감쇠 효과

거리감쇠효과는 진동원으로부터 임의 지점의 진동 레벨을 기준으로 하고, 거리변화에 따른 진동 레벨을 측정하여 기준값과의 측정값비로 표시되며, 험진기기의 허용진동범위에 따른 슬래브내에서의 설치 위치선정시 중요한 자료로 이용할 수 있다. 그림 13은 슬래브내에서의 거리감쇠효과를 도시한 것으로 거리가 증가함에 따라 기준점에 대한 측정점의 진동 레벨이 급격히 감소함을 알 수 있다.

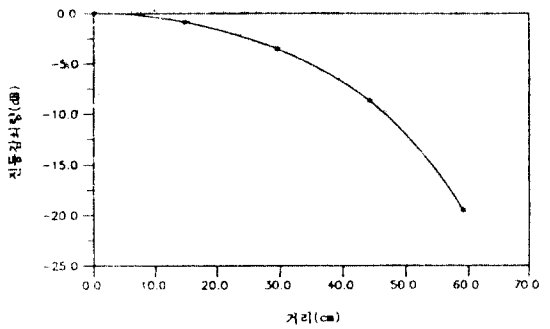


그림 13. 거리감쇠 효과

6. 결 론

본 연구에서는 철근콘크리트 슬래브구조의 진동 대책을 제시하기 위하여 보행가진력을 모형화하였으며, 철근콘크리트 슬래브구조의 동적 및 진동 거동을 평가할 수 있는 구조해석 과정을 개발하였으며, 동일조건의 해석결과와 실험결과를 비교하므로서 구조해석과정의 타당성을 검증하였다. 본 연구로부터 얻어진 연구결과는 다음과 같다.

1. 본 연구의 대상구조물인 철근콘크리트 슬래브의 경우, 콘크리트의 탄성계수가 2.41868×10^5 kg/cm^2(σ_{ck} : 260 kg/cm^2)이상이면 탄성계수 증가에 따른 진동특성의 개선이 그 이하인 경우에 비하여 현저히 둔화되므로, 진동제어를 위한 콘크리트의 압축강도는 260 kg/cm^{2}로 선정하는 것이 바람직하며, 향후 구조물의 허용진동범위에 따른 재료선택의 기준으로 확대 적용이 가능한 것으로 사료된다.

2. 철근콘크리트 슬래브의 형상에 따른 진동제어효과는 정방형의 경우에 비하여 길이/폭이 1.5인 직사각형인 경우가 가속도, 속도 및 변위를 각각 78.3 %, 61.9 %, 38.8 % 저감할 수 있으므로 직사각형 형태의 철근콘크리트 슬래브가 진동제에 효과적으로 사용될 수 있음을 밝혔다.

3. 철근콘크리트 슬래브 지점부의 지지조건 변화에 따른 해석 결과로부터, 진동제어를 위하여 방진기구를 사용할 경우 슬래브내에 다른 가진원을 두는 것은 좋지 않으며, 슬래브의 고유진동수와 가진진동수와의 공진여부를 검토한 후 방진기구를 사용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

4. 보행가진력이 작용할 경우, 대상 콘크리트슬래브의 동적응답에 대한 거리감쇠효과를 구하였다. 이 결과는 험진기기의 설치위치선정에 필요한 자료로 사용될 수 있으며, 향후 정밀방진계획 수립시 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Bachmann, H., "Case Studies of Structures with Man-Induced Vibration", *Jr. of Structural Engineering*, ASCE, Vol.118, No.3, 1992, pp.631-647.

2. 玉木常博 外, 精密防振ハンドブック, 日經印刷株式會社, 1987.

3. Grace, N. F. and Kennedy, J. B., "Dynamic Analysis of Orthotropic Plate Structure", *Jr. of the Eng. Mechanics Div.*, ASCE, Vol.111, Aug., 1985, pp.1027-1037.

4. 鶴田 顯, "精密機器用 制振-免震 床の開發," U.D.C.(日本), 第70券, 2號, 1988, pp.47-52.