

진동기계기초 전용 구조해석 및 설계 통합 시스템의 개발

Development of Integrated System for Structural Analysis & Design of Foundation for Vibrating Machines

이 동 근*
Lee, Dong-Guen

김 현 수**
Kim, Hyun-Su

손 권 익***
Sohn, Kwon-Ik

임 인 목****
Lim, In-Mook

ABSTRACT

Analysis and design of vibrating machine foundations subjected to dynamic loads is a very complex problem. Thus it is difficult to set up an accurate analytical modeling. Generally, the design of foundations for vibrating machines has been performed by the equivalent static analysis which is generally based on engineer's experience and various assumptions.

The purpose of this study is to develop an integrated system which enables structural engineers to produce results of high quality within a short time in works related to structural analysis and design of foundation for vibrating machines.

As the result of this study, level-up of application software is expected as well as improvement of quality in structural engineering and reduction of engineers' effort.

1. 서 론

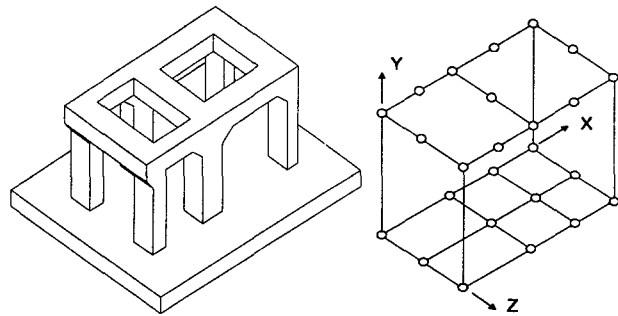
여러 가지 종류의 진동기계들을 지지하기 위한 진동기초의 설계는 탑재된 기계에 의한 진동을 고려하여야 하기 때문에 일반 구조물의 기초 설계와는 달리 고려하여야 할 특수한 문제들이 있다. 주로 정적하중에 대한 지내력만을 검토하여 설계하는 일반 기초와는 달리 진동기초는 탑재된 기계 진동에 의한 동적하중의 영향도 고려하여야 하기 때문에 설계가 다소 복잡해진다. 즉 정적 및 동적하중에 의한 부동 침하, 변형 및 균열이 발생하지 않도록 기초를 설계하여야 하며 기초의 진동에 의하여 지반을 통하여 전파되는 진동이 사람이나 주변 구조물 또는 진동에 민감한 기계의 생산 공정에 영향을 주지 않아야 한다.

* 성균관대학교 건축공학과 교수
** 성균관대학교 건축공학과 박사과정
*** 한국중공업주식회사 부장
**** 한국중공업주식회사 대리

설치된 기계의 가동에 의해 진동이 발생하는 기계기초는 변형이 가능한 지반 위에 놓여있게 되므로 매우 복잡한 거동을 하게 된다. 따라서 상당히 높은 수준의 이론과 기술을 적용하여야 예측과 분석이 가능하게 된다. 그러나 실무 기술자들이 유한요소법, 구조동력학, 지반공학등의 이론과 기술을 고루 획득하고 실무에 적용시키기에는 현실적으로 상당한 어려움이 있다. 뿐만 아니라 진동의 제어에 관한 연구가 체계적으로 이루어지지 않고 있어서 진동에 의한 문제가 발생하는 경우가 많다. 또한 실무자들이 진동기계기초를 모형화해서 해석하기 위해서는 범용 구조해석 프로그램을 사용해야하는데 일반적으로 사용되고 있는 범용 구조해석 프로그램들은 그 구조 및 입출력 조작성이 매우 복잡하여 수행 중 오류를 발생시킬 가능성이 크다. 실제로 엔지니어가 범용 구조해석 프로그램을 숙지하고 그것을 이용하여 진동기계기초를 모델링하여 정적 및 동적 해석을 하고 그 결과를 검토하여 설계까지 하기에는 상당한 시간과 노력이 필요할 것이다. 따라서 본 연구에서는 실무자들이 쉽게 익히고 사용할 수 있도록 모델의 입력, 해석, 결과의 검토 및 설계가 윈도우 상에서 통합적으로 이루어지는 진동기계기초 전용 해석 및 설계 시스템(이하 통합시스템)을 개발하여 초급 기술자들도 쉽게 고급의 기계기초 설계 기술을 활용할 수 있도록 하고자 한다.

2. 기존의 진동기계기초 해석모델

최근에 이르기까지 진동기초에 대한 설계는 대개의 경우 경험과 여러 가지 가정에 근거한 등가정적해석에 의하여 이루어지고 있으며 또 동적해석을 한다 하더라도 현재 실무에서 널리 사용되고 있는 진동기초 해석모델⁽⁶⁾이 몇 가지 문제점을 가지고 있다.



a) 기초의 형태

b) 해석 모델

그림 1. 프레임형 진동기계기초

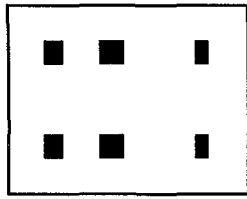
- 가) 기초판의 로킹 진동에 대한 문제
- 나) 보와 기둥의 연결부에 대한 문제
- 다) 진동기계의 위치에 대한 문제
- 라) 작용하중에 대한 가정상의 문제점

따라서 본 연구에서는 개발하려는 통합시스템에는 기존에 널리 사용되는 해석모델이 가지고 있는 문제점을 개선한 새로운 해석모델을 사용하였다.

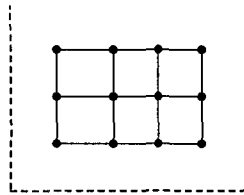
3. 진동기계기초의 효율적인 해석모델

3.1 기초판의 모형화

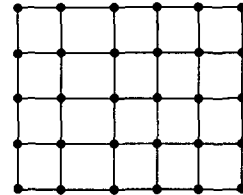
현재 실무에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 프레임형 진동기계기초의 모형화 방법은 그림 1과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 기초판은 여러 개의 등가의 보요소를 사용하여 모형화하게 된다. 그러나 프레임형 진동기계기초의 기초판에서 발생하는 로킹 진동을 효과적으로 고려하기 위해서 그림 2와 같은 모형화 방법이 필요하다.



(a) 기둥배치

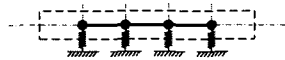


(b) 기존의 모형화



(c) 새로운 모형화

그림 2. 기초판의 모형화



(a) 기존의 지반 등가 스프링 모형화



(b) 확대된 기초판에 의한 등가 스프링 모형화



(c) 회전 스프링이 추가된 기초판

그림 3. 지반의 등가 스프링 모형화

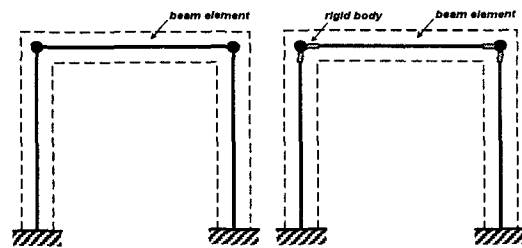
그림 2의 (b)에서 보는 바와 같이 기존의 모형화 방법에 따라 기초판을 해석하기 위해서는 기둥의 바깥선을 따라서 절점의 위치를 잡는다. 그림2의 (b)와 같이 기초판을 모형화 할 경우에는 기초판의 실제 크기보다 훨씬 작게 모형화가 된다. 기초판에 대한 로킹 진동은 기초판의 각 절점에 설치된 수직 방향 스프링에 의해서 결정되므로 기초판의 크기가 실제보다 작게 고려되었을 때에는 로킹진동 강성을 결정하는 수직스프링 사이의 거리(moment arm)가 짧아지므로 강성이 실제보다 작게 고려된다. 로킹진동 강성이 작게 고려되면 구조물의 가장 중요한 동적 특성중 하나인 구조물의 진동수가 작아지게 된다.

기초판의 실제 크기를 고려하여 등가의 보 요소를 기초판의 크기만큼 외곽으로 늘려서 모형화 한 방법이 그림 2의 (c)이다. 이러한 경우 그림 3의 (c)와 같이 지반의 등가 스프링을 확대된 기초판까지 분배를 하면 로킹 진동강성을 결정하는 수직 스프링 사이의 거리(moment arm)가 길어짐으로써 효과적으로 고려될 수가 있다. 이때 전체 수직 방향 스프링 상수의 합은 일정하고 수직 방향 스프링의 배치만 달라지게 된다.

확대된 기초판에 대하여 로킹 진동을 더욱 더 효과적으로 고려하기 위해서 그림 3의 (c)와 같이 수직 스프링만으로 제대로 고려되지 못한 로킹 진동 강성을 각 축방향에 회전 스프링을 추가함으로써 고려할 수가 있다. 즉, 추가되는 회전 스프링은 수직 스프링으로 고려되지 못한 각 축에 대한 로킹 진동의 나머지 강성을 기초판에 존재하는 절점의 수로 나누어서 근사적으로 산정할 수가 있다.

3.2 보와 기둥 연결부의 모형화

일반적으로 프레임형 진동기초의 기둥과 보는 3차원 보요소로 모형화된다. 프레임형 진동기계초의 기둥과 보는 길이에 비해 단면이 상대적으로 크기 때문에 연결부에서는 휨변형이 거의 일어나지 않는다. 따라서 그림 4(b)와 같이 기둥과 보의 연결부를 강체로 모형화하여 구조물의 강성을 더 크게 하는게 실제 구조물의 거동에 가까울 것이다.



(a) 기존 연결부에 대한 모형화

(b) 부재 연결부의 강체 모형화

그림 4. 보와 기둥의 연결부 모형화

3.3 진동기계의 모형화

기존의 진동기초 해석모델⁽⁶⁾에서는 기계질량의 위치를 탑재된 기계를 지지하는 지지부의 위치로 지정하고 있고 진동하중도 지지부의 위치에 절점을 두어 각각 가하였다. 그러나 기계질량의 실제 위치는 기계의 회전축으로 볼 수 있고 또 기계 자체는 하나의 강체로 생각할 수 있다. 그러므로 기계질량의 위치에 따른 구조물의 거동을 알아보기 위해서 새로운 해석모델에서는 기계의 회전축이 지지부에서 일정한 높이에 존재한다고 가정하고 그 위치에 질량을 두어 강제 요소로써 각각의 지지부로 연결하여 보다 실제에 가깝게 모델화 하였다. 이렇게 모형화를 하면 기존의 해석모델보다 기계 질량의 위치가 더 높은 곳에 위치하게 되므로 기계가 설치된 전체 구조물의 고유진동수는 기존의 모델보다 작아지게 된다.

3.4 작용하중의 모형화

기계회전 속도가 처음부터 정상상태라고 가정하는 이상화된 기계회전 속도를 생각한다면 하중의 진동수도 일정하게되고 하중의 모양은 그림 5(a)와 같이 된다. 그림 5(b)의 하중 그래프는 진동수는 일정하게 가정하고 하중의 크기만 변화시킨 모습이다. 이렇게 만든 하중은 크기가 점진적으로 증가하므로 그림 5(a)의 하중에서 발생하는 충격하중의 효과는 없어지게 되지만 진동수의 크기가 일정하게 되므로 기계가 설치된 구조물과의 공진문제는 고려할 수 없게된다. 따라서 본 연구에서는 하중의 크기 및 진동수까지 변화하는 그림 5(c)의 하중을 사용하여 구조물과의 공진관계도 고려할 수 있도록 하였다.

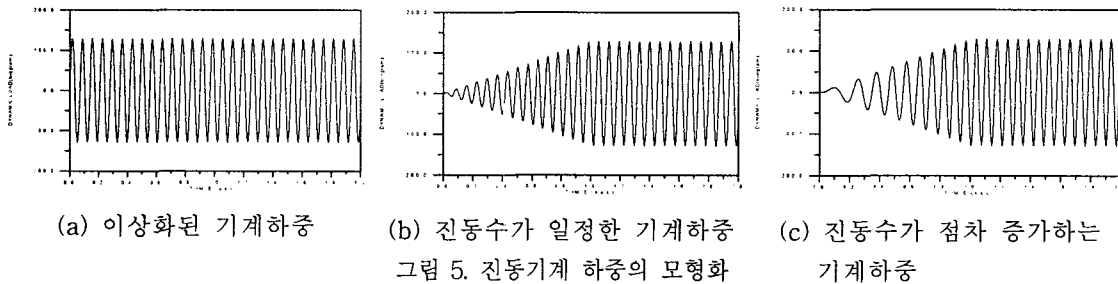


그림 5. 진동기계 하중의 모형화

4. 진동기계기초 전용 통합 시스템의 개발

4.1 진동기계기초의 설계 절차

일반적으로 모든 진동기계기초의 설계는 첫째, 사용기계가 설계된 기계기초 위에서 효율적으로 운전될 수 있어야하며 둘째, 기초구조물이 손상되거나 침하되지 않아야 하고 셋째, 기초의 진동이 사람이나 주변 구조물 또는 민감한 기계류의 생산공정을 방해하여서는 안된다. 이러한 설계원칙을 달성하기 위하여, 일반적으로 행하여지고 있는 진동기초의 설계절차는 그림 7과 같은 flow chart 형식으로 표현될 수 있다.

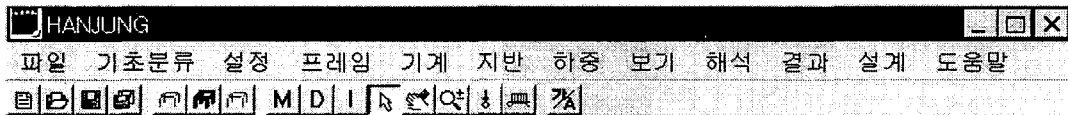


그림 6. 진동기계기초 전용 통합 시스템의 메뉴

이와 같은 설계 절차를 따라서 설계를 할 수 있도록 통합 시스템의 메뉴를 그림 6과 같이 만들었다. 메뉴의 체계는 실무 엔지니어들이 순서에 따라서 입력만 하면 모델입력, 해석, 설계까지 일괄처리될 수 있도록 만들었다. 메뉴의 체계에 따라서 입력하는 과정을 간략히 설명하면 다음과 같다.

- 『기초의 분류』 : 프레임형인지 블록형인지 선택, 말뚝의 유무에 따라 깊은 기초와 얇은 기초로 구분
- 『설정』 : 기계기초 입력시 기본적으로 필요한 데이터 입력
- 『프레임』 : 프레임형 진동기계기초의 상부구조물 입력 (블록형 진동기초에서는 비활성화됨)
- 『기계』 : 기계의 특성치, 기계와 기초의 연결상태 입력
- 『지반』 : 지반의 특성치, 기초의 특성치, 파일의 특성치, 파일의 위치등을 입력하여 지반을 등가의 탄성 스프링상수로 변환
- 『하중』 : 정적 및 동적하중을 정의하고 하중조건, 하중조합 설정
- 『보기』 : 각 작업단계에 따라 작업하기 위한 view상태를 선택
- 『해석』 : 해석옵션을 선택하고 해석을 수행
- 『결과』 : 정적 및 동적 해석의 결과를 그래픽과 텍스트로 확인
- 『설계』 : 각 부재와 기초를 설계

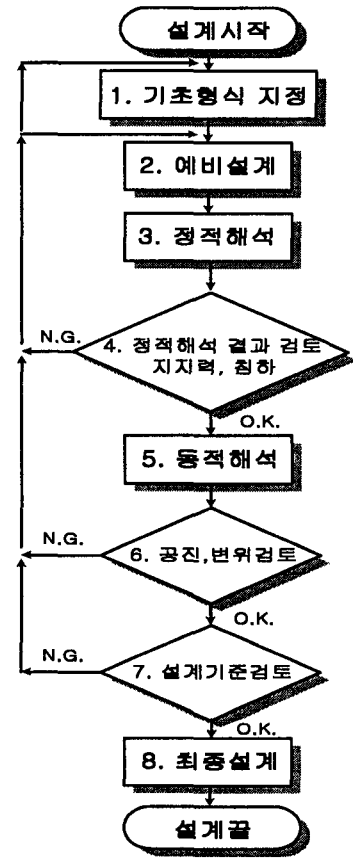


그림 7. 진동기초의 설계절차

4.2 전처리 프로그램

본 연구에서 개발 중인 통합시스템은 Window95상에서 실행이 되도록 하였고 편리한 GUI(Graphic User Interface)를 사용하여 실무자들이 보다 쉽게 프로그램을 익히도록 하였다. 전처리 및 후처리 프로그램은 C언어를 사용하여 작성하였고 구조해석 및 설계 프로그램은 포트란으로 작성하였다.

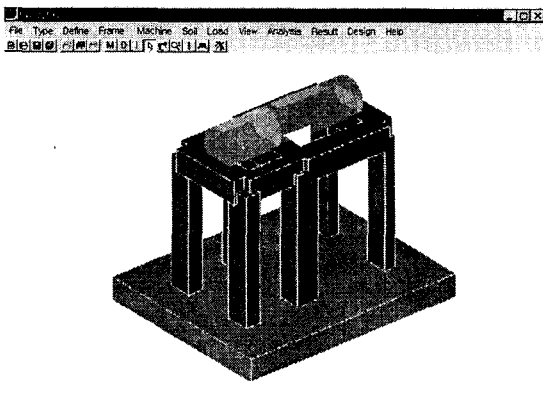


그림 8. 렌더링모델

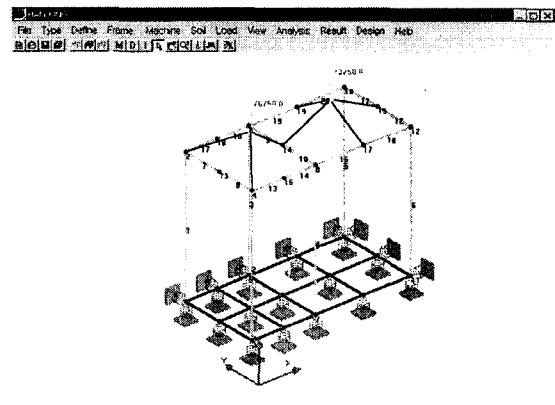


그림 9. 해석모델

사용한 컴파일러는 Microsoft사의 FORTRAN POWERSTATION 4.0과 VISUAL C++ 5.0이다.

그림 8은 통합시스템의 전처리기를 사용하여 프레임형 진동기계기초 예제를 모델링하였을 때 볼 수 있는 렌더링모델이고, 그림 9는 해석모델이다. 렌더링모델을 통해서 예제 구조물의 실제 부재의 크기와 위치 기계의 형태 등을 쉽게 파악할 수 있다. 해석모델을 통해서 절점번호, 부재번호, 진동기계의 연결상태, 지반 및 기초판의 모형화 상태등을 파악할 수 있다.

일반 범용 프로그램에서 그림 9와 같은 모델을 입력하기 위해서는 절점입력, 부재입력, 스프링 상수결정 및 입력, 기계의 위치 입력, 강체 설정등과 같은 단계를 거쳐야 한다. 하지만 본 연구에서 개발된 통합시스템을 이용하면 메뉴의 순서에 따라 원하는 값을 그래픽화면을 통하여 간단히 입력해주기만 하면 된다.

4.3 모형화 방법의 선택

모든 구조물은 적절한 가정에 의한 모형화를 통해서 해석되고 설계된다. 진동기계기초는 그 모형화 방법에 따라서 구조물의 거동이나 특성들이 많이 달라지게 된다. 따라서 합리적인 가정을 통해 보다 실제에 가깝게 표현할 수 있는 모형화 방법이 필요하다. 그러기 위해서는 여러 가지 모형화 방법을 적용하여 각각의 해석 모델을 만들고 해석을 수행하여 결과를 분석하여 보아야할 것이다. 그런데 이러한 작업을 범용 프로그램을 이용해서 한다면 아무리 프로그램에 익숙한 사용자라 하더라도 상당한 노력과 시간이 필요할 것이다. 그리고 구조동력학이나, 지반공학 등에 익숙하지 못한 초급 기술자가 진동기계기초를 합리적인 가정을 통해 모형화하기란 쉬운 일이 아니다. 본 연구에서 개발한 통합 시스템에서는 전문적인 '효율적인 해석모델'을 기본적으로 제공해주므로 초급 기술자도 고급의 모형화 기술을 쉽게 사용할 수 있다. 통합 시스템에서 제공하는 해석 옵션의 메뉴는 그림 10과 같다. 그림에서 보이는 해석 옵션 중 원하는 모형화 방법을 선택해주시기만 하면 통합 시스템에서 자동적으로 원하는 해석모델을 생성해준다.

그림 11은 기초판의 실제크기를 고려해서 만든 해석 모델이고 그림 12는 기둥과 보의 연결부위를 강체로 모형화한 해석 모델이다.

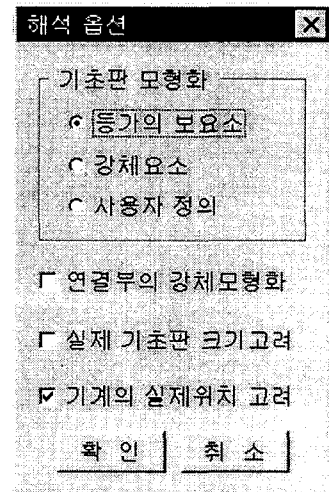


그림 10. 해석옵션

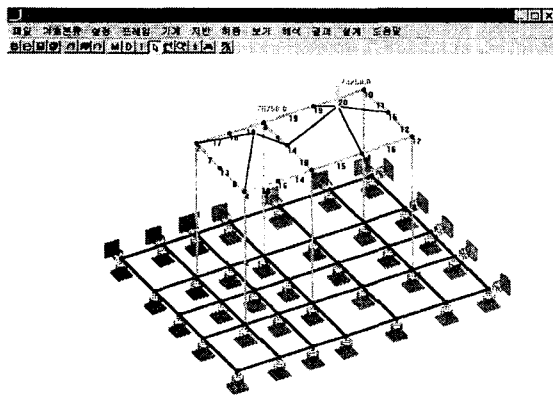


그림 11. 실제 기초판 크기 고려

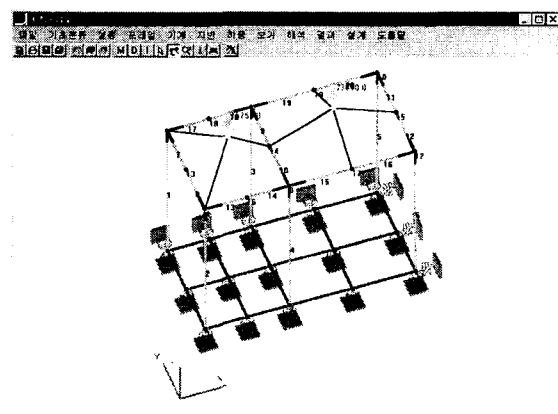


그림 12. 연결부 강체 모형화

4.4 후처리 프로그램

전처리 프로그램으로 기본 해석 모델을 입력하고, 원하는 해석 옵션을 선택한 후 해석 수행 버튼을 누르면 통합시스템의 자체 해석 프로그램으로 해석이 수행된다. 해석을 수행한 후 정적변위, 전단력도, 모멘트도, 모드형상, 변위시간이력 등의 결과는 그래픽을 통해서 사용자가 원하는 형식으로 확인할 수 있다. 그림 13은 모드형상을 그림 14는 시간이력 결과를 보여주고 있다. 해석이 수행된 후 해석 결과를 이용하여 설계를 수행할 수 있는데 그림 15, 16은 통합시스템에서 설계된 부재의 단면을 보여주는 화면이다.



그림 13. 모드형상

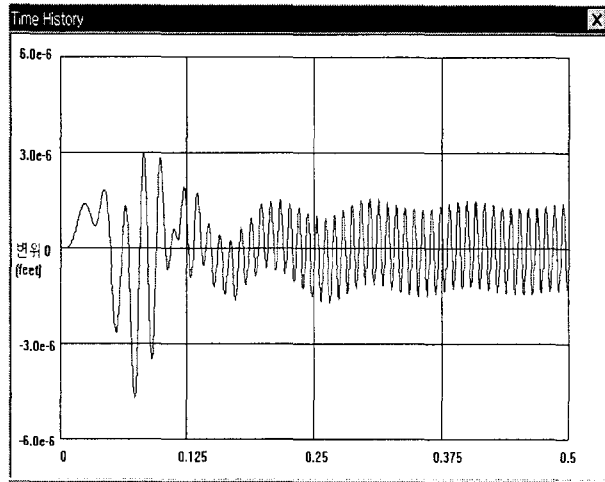


그림 14. 변위시간이력

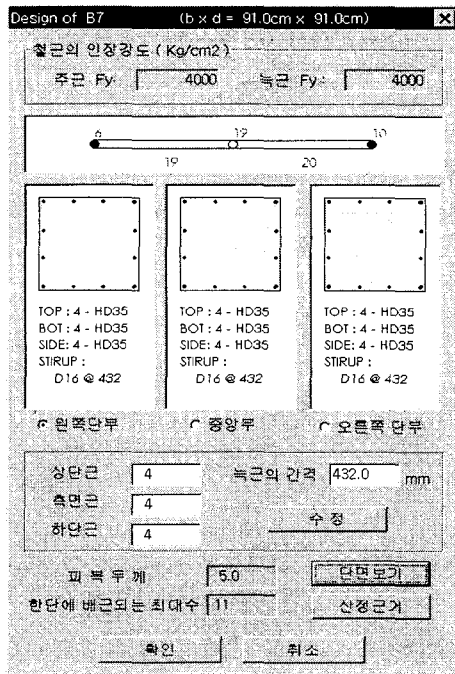


그림 15. 보의 설계단면

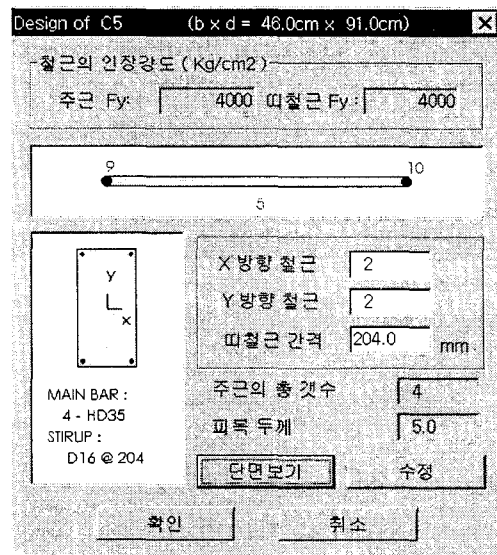


그림 16. 기둥의 설계단면

5. 결 론 및 추후 연구과제

본 연구는 진동기계기초를 계획해서 모형화하고 해석 및 설계하는 과정을 하나의 프로그램으로 통합하는 진동기계기초 전용 구조해석 및 설계시스템의 개발을 목적으로 수행되었다. 숙련된 고급기술의 전문가보다는 비전문가의 구조설계 작업을 지원할 수 있는 시스템의 구축이라는 점에 초점을 맞추고 개발하였다. 따라서 기계기초의 설계에 관한 기술력을 쉽게 확보할 수 있고 이를 통한 설계수준의 향상에 많은 도움이 될 것으로 생각된다.

추후 계속 연구를 수행하여 기존 기계기초에 진동문제가 발생하였을 때 진동의 원인을 추적하기 위한 기술이나 진동문제를 해결하기 위한 제진기술을 제시할 수 있는 전문가 시스템을 도입하여 기계기초에 발생하는 진동문제들을 해결하기 위한 수단으로도 활용될 수 있도록 할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 한국중공업의 연구비 지원으로 수행되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 이동근, 윤정방, 이승래, 진동기초 해석 및 설계 지침서, 한국중공업주식회사, 1994.12.
- 2) 이동근, 문성권, "프레임형 진동기초의 해석과 설계," 한국전산구조공학회지 제6권 제1호, 1992, pp.17-25.
- 3) 김현수, 진동기계기초의 효율적인 해석, 성균관대학교 대학원 공학석사학위 논문, 1997. 2.
- 4) 김현수, 최원호, 이동근 "프레임형 진동기초의 개선된 해석 모형," 대한건축학회 춘계학술발표대회, 1998
- 5) Arya, S. C., O'Neil, M. W., and Pincus, G., *Design of Structures and Foundations for Vibrating Machines*, Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 1979
- 6) Whitman, R. V., Richart, F. E., "Design Procedures for Dynamically Loaded Foundations," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 93, No. SM 6, November, 1967
- 7) Weaver, W., Gere, J. M. , *Matrix Analysis of Framed Structures, Van Nostrand Reinhold*, Third Edition.
- 8) Timoshenko, S. P., Weaver, W., and Young, D. H., *Vibration Problem in Engineering, John Wiley & Sons*, Fifth Edition.
- 9) Weaver, W., Johnson, P. R., *Structural Dynamics by Finite Elements, Prentice Hall*.
- 10) Kruglinski, *Inside Visual C++ 5.0*, 삼양출판사, 1998
- 11) Charles Petzold, *Programming Windows 95*, 1997
- 12) 송중호, *따라해보세요 Visual C++ 5*, 한글과 컴퓨터, 1998