

진동기초의 설계

심 종 성*

1. 서 언

지난 2월 한양대학교 박물관 세미나실에서는 본 학회에서 주관하는 제7회 기술강습회가 개최되었으며, 이 강습회중 세번째 강좌는 『진동기초의 설계』라는 주제로 진행되었다. 이 주제는 2년전 제3회 기술강습회에서도 다루어졌던 내용이었는 데, 요즈음 현장에서 그 수요가 늘어 다시 한번 다루게 된 것이다.

사실, 국내의 산업구조가 80년대부터 최근에 이르기까지 플랜트산업이 강조되어 왔고, 이들 중공업 산업시설의 대형화, 현대화로 인하여 각종 플랜트에는 진동을 수반하는 터어빈, 모터 등의 회전운동기계, 또는 충격해머등의 왕복운동기계를 지지하는 대형 기계기초가 필요하다. 기계기초는 일반기초와는 달리 기계의 운전성능 확보, 작업환경 및 생산능률 향상, 기초의 구조적 안전도 확보 등의 목적으로 정밀하고 엄밀하게 설계되어져야 한다.

그러나, 최근에 이르기까지 국내의 진동기초 설계는 대개의 경우 경험과 편법에 따른 정적해석 결과에 근거하여 설계되고 있거나 건설업체의 자체 설계기준, 또는 설계편법에 의존하고 있는 실정이다. 이와같은 이유는 일반적으로 진동기초의 설계 및 해석은 기계진동학, 구조동역학, 토질동역학 등 서로 그 배경을 달리하는 세 분야에서 전문지식을 필요로하는 매우 어렵고 복잡한 문제로 인식되어 있기 때문이다. 따라서, 대개의

경우 중요한 진동기초가 아니고는 근사적 등가정적 해석에만 근거하여 얻어낸 기초설계도면이나, 외국 기계제작자가 제공하는 vendor drawing에 근거하여 진동기초가 시공되고 있다.

선진외국에서는 이 분야에 대한 관심이 약 20년전 부터 모이기 시작하였으며, 최근 급격하게 발달된 구조해석이론 및 컴퓨터 장비의 현대화를 배경으로 진동기초의 설계는 동적해석방법이 보편화되어 있을 뿐 아니라, 엄밀한 설계기준도 표준화되어 있다.

본 특집은 이러한 국내외 실정을 감안하여 최근 널리 사용되고 있는 보편화된 해석이론 및 설계이론을 다섯 개의 세부 주제로 나누어 소개함으로써 이 분야에 관심을 둔 국내 기술인에게 도움을 주고져 하는데 그 목적을 두고 있다. 첫번째 주제인 본 기사에서는 진동기초의 설계개념을 소개하기 위하여 진동기초의 분류방법을 2절에서 소개하였고 이어서 3절에서는 기초형식의 선정원칙을 기술하였다. 4절에서는 진동기초의 설계기준에 대하여 널리 사용되고 있는 설계용 도표를 근거로 설명하고 있으며, 5절에서는 일반적인 진동기초의 설계과정을 flow chart 형식으로 제시한 후, 각 단계에 대한 설계개념을 간략하게 서술하였다. 마지막으로 6절에서는 예비설계 요령을 기술하였다.

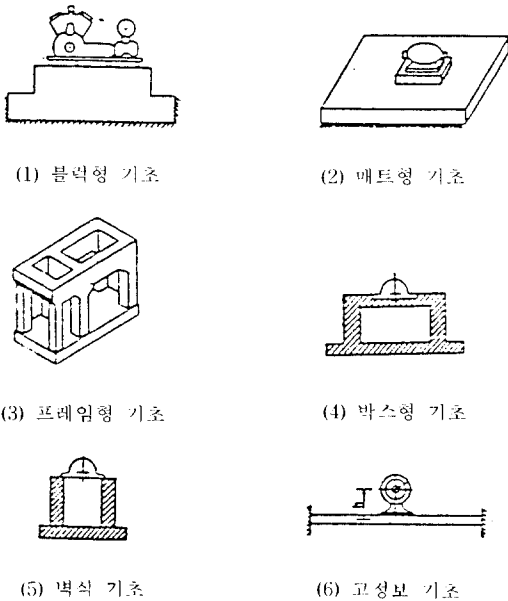
2. 진동기초의 분류

진동기초는 기초가 지반에 지지되는 형식에 따라 얕은기초(shallow foundation)와 깊은기초

* 한양대학교 토목공학과 조교수

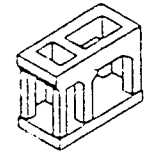
(deep foundation)로 분류된다. 얕은기초는 직접기초라고도 불리며, 기초가 지반에 접하는 접지면에서의 지반 지지력에 의하여 기초가 지지되는 형식을 일컬으며, 깊은기초란 얕은기초로 설계할 경우 접지면으로는 충분한 지지력을 확보하지 못하는 경우 말뚝을 이용하여 지지력을 확보하는 형식을 일컫는다.

진동기초는 또한 기초의 형상에 따라서도 분류되는데, 널리 사용되고 있는 형식으로는 불력형 기초, 매트기초, 프레임형 기초, 박스형 기초, 벽식 기초, 고정보 기초 등을 들 수 있다.

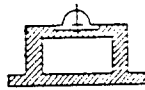


(1) 불력형 기초

(2) 매트형 기초



(3) 프레임형 기초



(4) 박스형 기초



(5) 벽식 기초



(6) 고정보 기초

그림 1. 형상에 따라 분류된 대표적인 진동기초의 종류

진동을 받는 기초는 또한 기계진동수와 설계된 기초의 고유진동수를 비교함으로써 고진동기초 (high-tuned foundation)와 저진동기초 (low-tuned foundation)로도 구분된다. 고진동기초란 설계된 기초의 고유진동수가 진동을 유발하는 기계의 정상운행중 진동수보다 큰 기초를 일컬으며, 저진동기초란 위의 경우와 반대인 경우를 말한다.

3. 진동기초 형식의 선정

진동기초의 형식선정은 우선 기초가 놓일 지반

조건에 따라 얕은기초 혹은 깊은 기초로 결정된다. 여기서, 지반조건이란 기초지반의 각종 토질특성을 표현하는 계수 및 지하수위 레벨과 관련되며 통상 토질기술사의 분석을 통하여 제공되는 허용 지지력 값을 일컫는다. 기초 형식의 선정원칙은 가능한한 얕은기초로 결정한다는 것이다. 예컨대, 불력형 얕은기초로 가정할 때, 요구되는 허용 지지력이 현 지반에서의 허용지지력을 초과하면, 우선 매트형 기초로 시도하며, 이 조건이 역시 불만족스러울 때 비로소 깊은 기초로 기초형식을 바꾸게 된다.

기초의 형태 결정은 충격하중이나 주기가 비교적 긴 하중을 제공하는 기계기초는 불력형 기초를 택하고, 주기가 비교적 짧은 하중의 경우는 프레임형 기초를 택하는 것이 일반적이다.

또한 진동수에 따른 기초형식의 선정요령은, 대형 왕복엔진 혹은 컴프레서 등 기계 운전속도가 500rpm(8Hz)이하인 경우에는 고진동기초로 설계하며, 고속내연기관, 전기모터, 발전기 등 기계 운전속도가 1000rpm(16Hz)이상인 경우에는 일반적으로 저진동기초로 설계한다. 저진동기초로 설계될 경우에는 기계의 시동(start-up) 및 제동(shut-down)시 기계의 진동수가 기초의 고유진동수와 순간적으로 일치하는 공진(resonance)이 발생되므로 반드시 이에대한 검토가 요망된다. 통상 저진동기초 혹은 고진동기초의 진동수는 기계진동수의 40~50% 정도가 각각 낮거나 높도록 설계한다.

4. 진동기초의 설계기준

모든 기계기초는 기계의 진동수가 기초의 고유진동수와 일치하는 공진현상을 피해야 하며, 어떠한 진동이든 진동의 진폭이 안전한계를 넘어서는 안된다. 이 두가지 사항은 어느 정도의 범위 내에서는 서로 연관이 있지만, 대개 이 두가지 사항은 별도로 고려한다.

진동수와 진동에 근거한 설계기준은 기계의 손상에 대한 제한사항, 건물이나 구조물의 손상에 대한 제한사항, 인간의 안정감을 확보하기 위한 진동의 제한사항, 기초의 허용치 이상의 침하로

인한 지반의 교란 가능성에 대한 제한사항 등으로 분류될 수 있다.

우선 왕복기계기초를 중심으로 위에 나열한 설계기준을 좀더 상세하게 소개하고자 한다.

(1) 공진을 방지하기 위한 설계기준: 왕복운동을 하는 기계류(8~16Hz)에서 공진을 방지하기 위한 설계의 원칙은 기계진동수의 최대값은 항상 기초의 고유진동수보다 작게 설계한다는 것이다. 즉, 중요장비의 경우에는 주파수비(fm/fn)가 0.5보다 작아야 하며, 일반적으로는 주파수비 값은 0.6보다 작아야 한다. 그러나 상기 주어진 값을 도저히 얻지 못할 경우 기계진동수의 최소값에 대한 주파수비(fm/fn)값은 각각 2 또는 1.5보다 크게 설계한다.

위의 기준들은 모든 가능한 진동모드에 대해 적용시켜보아야 하지만, 어느 경우라도 기계진동수가 고유진동수보다 크다면 기계가 작동을 시작하면서 공진진동수를 통과하기 때문에 공진진동수에 대한 검토가 필요하다.

(2) 기계의 손상을 방지하기 위한 진동진폭의 한계: 기계 제작자가 기계의 손상을 방지하기 위하여 기초의 진동에 대한 최대진폭을 제한하였을 경우에는 반드시 규정된 한계진폭을 초과해서는 안된다.

(3) 건물의 손상을 방지하기 위한 진동진폭의 한계: 허용진폭을 규정할 때는 인접 건물과 구조물 그리고 그 건물과 구조물들이 포함된 다른 기계에 대해서도 고려하여야 한다. 진동기초의 진폭이 진동수가 20Hz이하에서 200 μ m보다 작으면 공진에 의한 인접 구조물의 손상은 고려할 필요가 없으며, 기계진동수가 20Hz를 넘을 경우는 허용진폭은 좀 더 낮아져야 한다. 진동수에 따른 허용진폭값은 그림 2의 ADD'선 아래부분의 값으로 정할 수 있다.

(4) 인간의 불쾌감을 방지하기 위한 진동진폭의 한계: 높은 속도로 작동되는 기초의 경우, 인간생활에 주는 영향을 고려하여야할 특별한 이유가 있을 때는 좀 더 낮은 허용진폭이 필요하며, 이 경우 그림 2의 ADD' 또는 ABB'의 아래부분의 값을 만족하여야 한다.

(5) 기계기초의 침하를 방지하기 위한 진동진폭

의 한계: 대부분의 토질에서는, 한계진폭이 200 μ m이하로 설계된 낮은 속도로 작동되는 기초에서는 동적하중에 의한 침하는 발생되지 않는다. 그러나 느슨한 사질토나 실트질지반의 경우 또는 지하수위가 높은 경우에는 과도한 침하가 발생될 수도 있다. 이러한 가능성이 있는 토질에 대한 기초의 설계에는 토질공학자와의 긴밀한 협조가 반드시 요망된다.

(6) 안전율: 상기 언급한 여러가지의 한계는 절대치이며, 안전율을 포함하고 있지 않다. 그러므로 기초의 최종설계는 전술한 진폭보다 적은 값으로 설계되어야 한다. 안전율은 계산의 정확도와 토질 데이터의 정확도에 좌우되므로 안전율에 대한 특별한 지침은 없다. 그러나 대부분의 경우 계산된 진폭이 허용치의 2/3이상을 넘어서는 안된다.

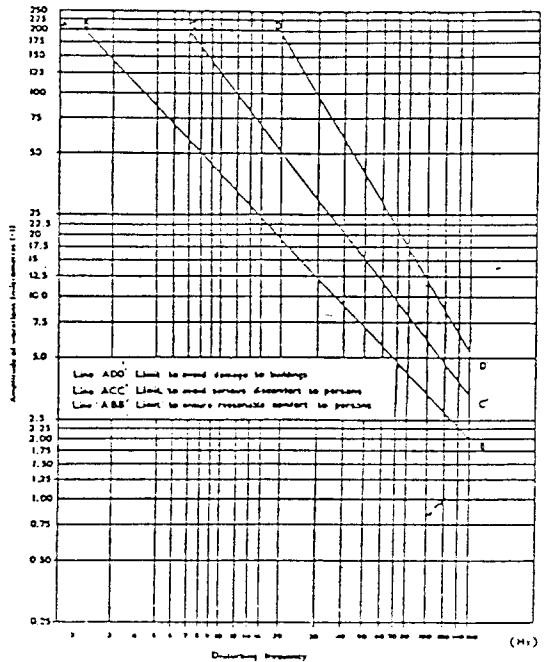


그림 2. 기초 불력의 허용 진폭

두번째로 회전운동 기계기초의 설계기준을 살펴보면,

(1) 공진을 방지하기 위한 설계기준: 일반적으로

회전운동을 하는 기계류(16Hz이상)에서는 공진을 방지하기 위하여 주파수비(fm/fn)를 0.4~0.5정도로 제한하여 저진동기초가 되도록 제안하고 있다.

(2) 진동진폭의 한계: 회전운동을 하는 기계의 기초설계기준에서는 허용치를 진동의 최대진폭, 진동의 최대속도 또는 최대가속도 등 다양한 형태로 표현하고 있다. 일반적으로 기계나 기초에 피해가 생기지 않게 하기위해서 최대속도는 2.5cm/s, 최대가속도는 0.5g(g: 중력가속도)를 초과하지 않아야 한다. 민감한 기계류를 안전하게 지지하기 위해서는 낮은 진동수에서 진동가속도를 10^{-4} 정도로 제한해야 한다. 그림 3은 상기 한계값을 나타내고 있으며, 그림 4 및 5는 각각 수직 및 수평 허용진동진폭을 나타내고 있다.

기계의 운전한계는 그 기계의 기능과 중요도에 따라 결정되어지나, 초기투자, 작동정지 동안의 손실을 포함한 보수경비와 교체비용을 고려하여 결정되어야 한다.

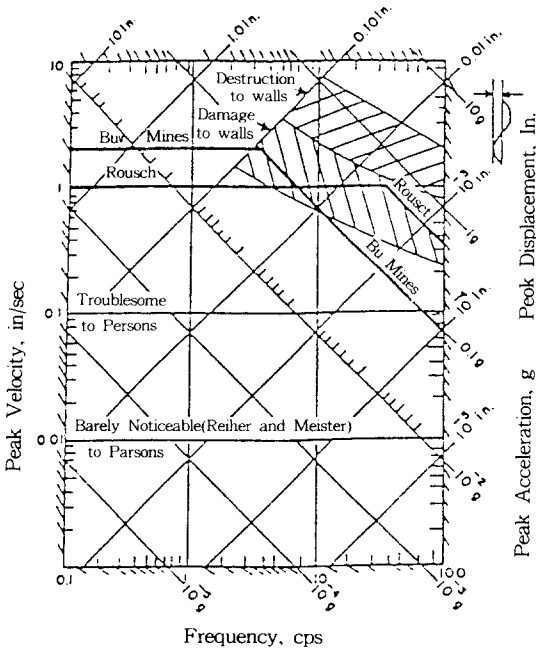


그림 3. 허용 진동한계의 응답 스펙트럼

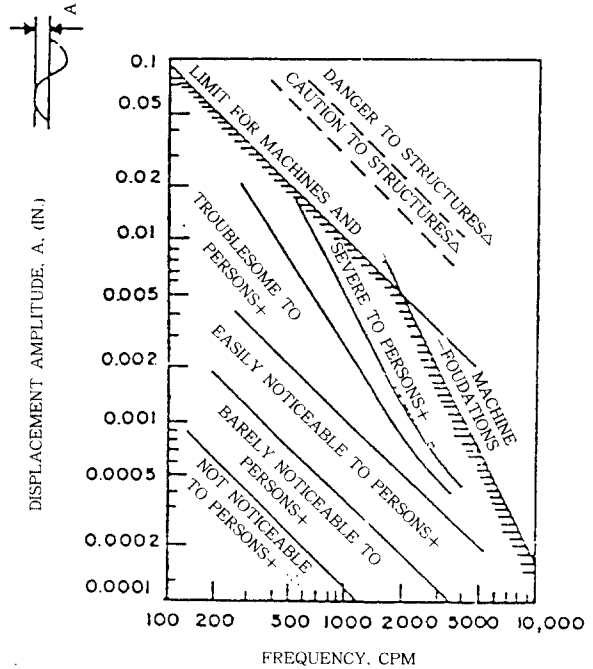


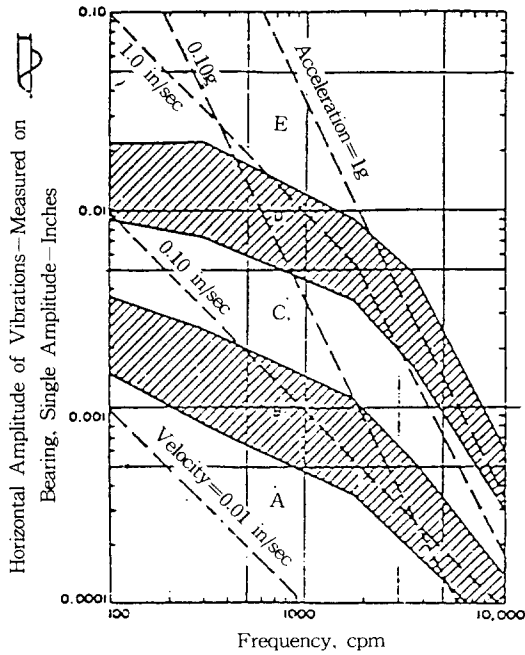
그림 4. 진동수에 따른 허용 수직 변위

(3) 안전율: 회전운동을 하는 기계들은 그들의 상대적인 중요도에 따라 원심펌프, 전기모터, 팬의 경우 1.0, 터빈, 터브 발전기, 원심 압축기 등의 경우에는 1.6, 원심기계, 단단한 샤프트(stiff-shaft), 다단식 원심펌프 등에는 2.0 등의 안전계수가 사용되고 있다. 유효진동진폭은 실제 진동진폭에 이와같은 안전계수를 곱하여 구한다.

5. 설계절차

일반적으로 모든 진동기계기초의 설계는 첫째, 사용기계가 설계된 기계기초 위에서 효율적으로 운전될 수 있어야 하며, 둘째, 손상되거나 침하되지 않아야 하고, 셋째, 기초의 진동에 대한 진동이 사람, 주변 구조물 또는 민감한 기계류의 생산공정에 유해하여서는 안된다. 마지막으로 설계된 기초는 진술 사항을 만족시키는 가장 경제적인 것이어야 한다.

상기 서술된 설계원칙을 달성하기 위하여, 일반



EXPLANATION OF CASES

- E DANGEROUS. SHUT IT DOWN NOW TO AVOID DAN!
- D FAILURE IS NEAR. CORRECT WITHIN TWO DAY! TO AVOID BREAKDOWN.
- C FAULTY. CORRECT WITHIN TO DAYS TO SAVE NAIINTENANCE DOLLARS.
- B MINOR FAULTS. CORRECTION WASTES DOLLARS.
- A NO FAULTS. TYPICAL NEW EQUIPMENT.

그림 5. 진동수에 따른 허용 수평 변위

적으로 행하여지고 있는 진동기초의 설계절차는 그림 6과 같은 flow chart 형식으로 표현될 수 있다.

제시된 flow chart를 단계별로 설명하면, 첫번째 단계인 기초형식의 선정단계는 기계특성 및 재원을 기계기술자로부터, 그리고 기초지반의 허용지력 등을 토질기술자로 부터 획득함으로써 가능하게 된다.

두번째 단계인 예비설계 과정에서는 선정된 기초형식에 걸맞는 재료 및 각종 단면치수들을 가정하게 되는데, 다른 일반적인 설계문제에서와 마찬가지로 가정이 합리적이면 쉽게 최종설계단계에 이를 수 있으나 그렇지 못하면 많은 시산(trial & error) 과정을 거치게된다. 따라서 본 기사에서는 예비설계 요령에 대한 가능한 많은 정보를

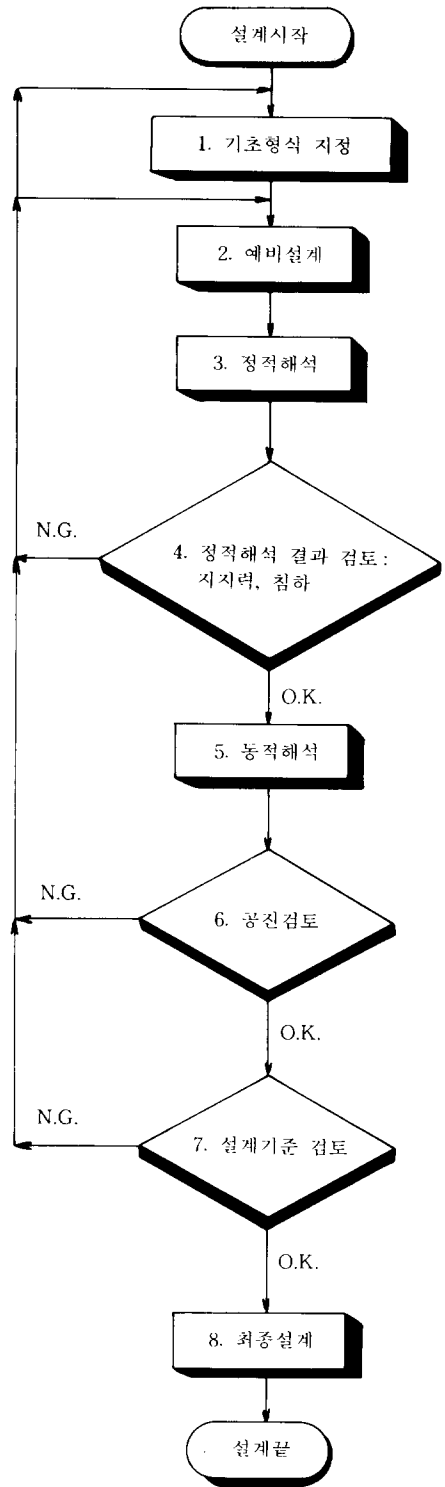


그림 6. 진동기초의 설계절차

제공하고 있다.

세번째 및 네번째 단계에서는 가정된 단면에 근거하여 진동기초의 정적해석을 수행하고 그 결과(즉, 기초의 침하량 및 소요 지지력)를 지반의 허용 침하량 및 허용지지력과 비교함으로써 두 값이 서로 만족스러울 때까지 우선은 단면치수만을 조정해보고, 여의치 않은 경우 기초형식까지도 변경하게되는 설계절차를 도시하고 있다.

정적해석 결과가 만족스러울 때, 비로소 다섯번째 단계인 동적해석을 수행하게 되며, 이 과정에서는 진동기초에 대한 진동수, 진동모드 그리고 최대진폭, 속도 및 가속도값을 얻게 된다.

동적해석결과에 대한 검토는 여섯번째 단계인 공진에 대한 만족여부 및 일곱번째 단계인 본 기사 4절에서 언급되었던 각종 설계기준에 대한 만족여부를 조사하는 단계로 이루어진다. 앞서 언급하였지만 동적해석 결과가 만족스러울 때까지 단면치수 혹은 기초 형식까지도 계속해서 변화시키게 되며 따라서 예비설계과정의 역할은 매우 중요하다고 하겠다. 네번째, 여섯번째 그리고 일곱번째 단계인 모든 검토 사항이 만족스러울 때 시공도면을 작성하게 되며, 이 단계를 최종설계라고 부른다. 이 단계는 일반적인 설계과정과 유사하므로 본 기사에서는 언급을 생략하였다.

6. 진동기초의 예비설계 요령

본 기사 2절에서 이미 소개하였듯이 진동기초의 종류는 블럭형, 프레임형, 매트형, 박스형, 벽식, 고정보 기초 등 여러가지가 있으나, 본 절에서는 이 중 가장 널리 사용하고 있는 블럭형 기초 및 프레임형 기초의 예비설계요령을 기술하고자 한다.

우선 블럭형 기초의 예비설계요령을 살펴보면,

(1) 기초의 질량은 기계질량보다 반드시 커야한다. 일반적으로 왕복운동기계류의 경우 3~5배를, 그리고 회전운동 기계류는 2~3배 정도를 확보한다.

(2) 기초의 무게중심은 기계의 무게중심과 동일 수직선상에 위치해야 한다. 부득이한 경우, 편심의 크기는 축면 길이의 5%이내 이어야 한다.

(3) 기계와 기초 시스템의 무게중심은 가능한한 블럭내에 위치하도록 한다. 단, 기초 상부의 finish floor는 표면수에 의한 피해를 감소하기 위해 바닥보다 30cm정도 높인다.

(4) 기초의 폭은 기초바닥부터 기계중심까지의 수직거리의 1~1.5배를 사용함으로써 rocking 모드에 대한 안전성을 확보해야 한다.

블럭형기초 다음으로 널리 사용되고 있는 프레임형 기초의 예비설계요령은 다음과 같다.

(1) 매트를 포함한 프레임형 기초의 전 질량은 기계질량보다 반드시 커야한다. 통상 왕복운동 기계류의 경우 5배, 회전운동 기계류의 경우 3배 정도를 확보한다.

(2) 기초매트의 두께는 $0.1L^{4/3}$ (단, L은 기둥간격의 평균값)이상이어야 하며, 매트의 바닥은 동결깊이 등을 고려한 최소깊이 이상이 확보된 지반에 놓여야 한다.

(3) 모든 기둥은 동일한 수평하중을 받도록 기둥단면을 결정하여야 한다. 단, 설계된 기둥은 작용할 수직하중의 6배 이상의 하중을 감당할 수 있어야 하며, 기둥간격은 3.6m 이하를 권장한다.

(4) 모든 보의 휨강성은 기둥 휨강성의 2배 이상이어야 하며, 보의 두께는 최소 순경간의 1/5이상이어야 한다.

(5) 기둥의 저항중심은 기계 및 구조물 하중의 무게중심과 일치해야 한다. 부득이할 경우, 편심은 30cm이내이어야 한다.

(6) 기둥과 보의 예비설계 결과는 간편 계산을 통하여 기계와의 공진 가능성의 검토가 권장한다.

7. 결 론

본 기사는 지난 2월 한양대학교에서 개최되었던 제7회 기술강습회 교재의 내용을 발췌하여 요약정리한 내용으로서, 진동기초의 설계개념을 다른 일반적인 기초와의 차이점을 강조하면서 기술하였다. 본 기사에서는 전체적인 설계절차 및 개념을 소개하기 위하여 해석이론 부분의 언급을 회피하였는데 이 부분에 대한 내용은 다른 주제에서

다루게 된다. 즉, 두번째 주제에서는 블럭형 기초의 설계에 대한 해석이론 및 설계절차를 예제를 통하여 설명하고 있으며, 세번째 주제에서는 프레임형 기초, 그리고 네번째 주제에서는 깊은 기초에 대한 해석이론 및 설계절차를 역시 예제를 통하여 설명하였다. 마지막으로 다섯번째 주제에서는 기계진동을 차단하는 것을 목적으로하는 방진기초의 설계개념에 대하여 기술하고 있다.

끝으로 본 특집은 제7회 기술강습회에서 강사로 수고하셨던 분을 중심으로 기획되었음을 알리며, 본 특집이 이 분야에 관심을 두고 있던 많은 국내 기술인들에게 다소나마 도움이 될 수 있기를 바란다. 아울러 본 주제를 특집으로 채택하여 주신 한국 전산구조공학회 편집위원들에게도 지면을 통해 감사를 드린다.