

진동기 얽은기초에 추가되는 동적 연직하중 산정을 위한 모형실험 방안 연구

A Study on the Model Test for Estimating Dynamic Vertical Load Added to Shallow Foundation for Machine

하 익 수¹ Ha, Ik-Soo

유 민 택² Yoo, Mintaek

Abstract

At present, there are no clearly stated criteria or theories in calculating additional vertical dynamic loads that occur at the machine foundation due to vibration and reflecting them in the design at home and abroad. According to the domestic standard, although it is not a serious vibration condition, the additional dynamic load due to vibration is considered up to 100% of the static load. This is an extremely conservative design. The purpose of this study is to propose a model test method for evaluating the quantitative magnitude of additional dynamic loads that are generated at certain static loads due to vertical mechanical vibrations. As preliminary basic tests for the model tests, the test for evaluating the effects of reflective wave that may occur within a limited size soil box and the test for estimating the natural frequency of the devised model soil-foundation system were carried out. From the analysis of results for basic tests, a method to minimize the influence of the reflected wave was prepared, and the effect of the resonance of the model system was minimized during the model tests. After the basic tests, the main model tests were conducted. Through the proposed main test, the quantitative magnitude of additional dynamic loads caused by machine vibration on a shallow foundation for machine on medium dense sand foundations were evaluated. From the results of the model test, the feasibility of design applied at home and abroad was reviewed.

요 지

현재 국내외에서는 진동기계기초에 진동으로 발생하는 추가 연직 동하중을 산정하고 설계함에 있어서 명확하게 제시된 기준이나 이론이 정립되어 있지 않아 국내의 경우, 심각한 진동조건이 아님에도 불구하고 진동에 의한 추가 동하중을 정적하중의 최대 100%로 간주하는 극히 보수적인 설계가 이루어지고 있다. 본 연구의 목적은 연직 기계진동으로 인하여 정하중외에 추가적으로 발생하는 동적하중의 정량적 크기를 평가하기 위한 모형실험 방안을 제시하는 것이다. 실내 모형실험의 기초실험으로, 제한된 크기의 모형 토조 내에서 발생할 수 있는 진동 반사파의 영향을 분석 및 보완하였고, 제작한 모형 진동기계기초의 고유진동수를 산정하여 실험 시 공진영향을 최소화하였다. 제안된 기법을 적용한 본 모형실험을 수행하여, 중간 조밀도의 모래 기초지반에 놓인 기계진동 얽은 기초에 기계진동에 의해

1 정회원, 경남대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyungnam Univ., Tel: +82-55-249-2669, Fax: +82-505-999-2165, geotech@kyungnam.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

2 정회원, 철도기술연구원 철도구조연구팀 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Railroad Structure Research Team, Korea Railroad Research Institute)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2021년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

발생하는 추가적인 동하중의 정량적 크기를 평가해 보았다. 모형실험결과로부터, 현재 국내외에서 제시하고 있는 설계기법의 적합성을 논의해 보았다.

Keywords : Additional dynamic load, Machine foundation, Mechanical vibration, Model test, Shallow foundation

1. 서론

국내외에서 플랜트 산업이 활발함에 따라, 플랜트 시설의 기초를 이루는 진동기계 기초의 시공 수요도 증가하였다. 각종 플랜트에는 목적에 따라 다양한 기계들이 설치되는데, 기계의 작동에 의해 기초에 발생하는 진동의 종류에 따라 회전형, 충격형, 왕복형 기계가 있으며, 회전형 기계는 작동속도가 매우 빨라서 3,000~10,000rpm이고, 왕복형 기계의 작동속도는 대체로 1,200rpm 이내이다. 설치된 기계들의 회전 및 왕복운동으로 인해 발생하는 진동은 지지하고 있는 기초에 영향을 주어 추가적인 동적하중이 발생하게 되는데, 기초구조물의 설계에 있어서 기계진동하중을 받는 기계기초의 설계는 정하중만 받는 일반기초설계의 검토항목에 진동하중에 대한 검토를 추가하여 추가적으로 발생하는 동적하중의 영향을 고려하여 설계하여야 한다.

기계진동에 의한 기초거동을 파악하는 방법에는 수치해석적 방법과 모형실험에 의한 방법이 있다. 수치해석적 방법으로, Han 등(2013)은 범용 지반해석프로그램인 FLAC3D를 사용하여 단말뚝의 3차원 동적수치해석을 수행하고 추가적인 진동하중에 의한 말뚝기초의 연직지지력 변화를 분석하였으며, Lee(2014)는 수치모델링을 통해 연직 기계진동을 받는 마찰지 단말뚝의 거동 분석에 관한 연구를 수행하였다. 한국건설기술연구원에서는 얇은기초와 말뚝기초에 대한 수치모델을 구성하여 단순조건에서의 해석해와 비교함으로써 그 실효성을 확인하였고, 작성된 모델을 이용한 얇은기초, 말

뚝기초, 군말뚝에 대한 동적 수치해석으로부터 플랜트 진동기계 기초의 거동을 파악하였다(KICT, 2014). Ha와 Han(2016)은 기계진동에 의한 추가 진동하중이 진동기를 지지하는 단말뚝에 작용했을 때 말뚝에서의 연직하중 변화를 분석하고, 진동기계를 지지하는 단말뚝의 연직 지지력에 대한 일반적인 계산방법의 유효성을 검토하였다. 모형실험에 의한 방법으로, Novak과 Grigg(1976)는 소형 말뚝기초를 이용하여 단말뚝과 무리말뚝에 대한 동적실험을 현장에서 수행하고 실험결과에 대해 Novak이 제시한 이론과 비교하였고, Boominathan과 Lakshmi(2000)는 실내 모형진동기 실험을 통해 말뚝-지반의 상호작용이 무리말뚝의 동적 특성에 미치는 영향을 연구하였다. Manna와 Baidya(2010)는 기계식 진동기(Lazan type)를 사용해 말뚝기초의 일방향 진동을 유도하여 연직 진동 이론과 실험에 따른 말뚝 기초의 동적 비선형 응답을 연구하였다. Bhowmik 등(2016)은 연직 동적하중을 받는 서로 다른 길이의 단말뚝에 대한 동적 응답의 결과를 실험과 수치해석을 통해 비교하였다. 이러한 모형실험에 관한 연구들은 본 연구와 동일하게 연직방향의 진동을 유도하기 위하여 Lazan type의 진동기를 사용한 것으로 기술되어 있으나(Fig. 1 참조), 어떤 연구에서도 해당 진동기 내부구조 및 원리, 작동 모식도를 제시한 연구는 없었다. 이상과 같이 모형실험과 수치해석적 방법을 통해 기계진동에 의한 기초거동을 파악하고자 하는 여러 연구가 수행되어 왔으나, 본 연구에서 제시하고자 하는 진동기계 얇은기초에 추가적으로 발생하는 동하중의 크기를 정량적으로 산정하고자 하는 실

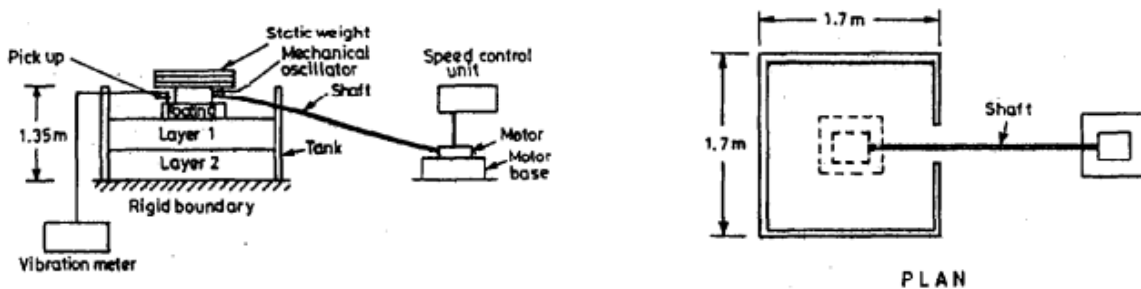


Fig. 1. Mechanical vibration experiment apparatus (Baidya and Muralikrishna, 2001)

험적 연구는 없었다.

Arya 등(1984)은 기초의 연직지지력을 산정할 때, 기계 제작사로부터 정보가 제공되지 않을 경우, 연직방향 등가 동적 설계력을 정하중의 50%로 간주하고 설계하도록 추천하였다. 국내의 경우, 구조물기초설계기준해설(KGS, 2018)에 의하면 기계기초 지반의 허용지지력은 진동하중을 고려하여, 정하중에 대한 허용지지력의 80% 이내 이어야 하며, 심각한 진동조건에서는 지반의 허용지지력을 정하중에 대한 허용지지력의 1/2로 감소하여 적용하도록 명시하고 있다. 이는 추가 동하중의 개념으로 봤을 때, 추가 동하중은 정하중에 대해 심한 경우에는 100%, 보통의 경우 25% 이상이 더 추가로 발생하는 것으로 보는 것과 같다. 이상과 같이 현재 국내의에서는 진동기계기초에 기계진동으로 발생하는 추가 연직 동하중을 산정하고 설계함에 있어서 명확하게 제시된 기준이나 이론이 정립되어 있지 않다. 이러한 이유로 국내의 경우, 심각한 진동조건이 아님에도 불구하고, 진동에 의한 영향을 고려하여 지반의 허용지지력을 정하중에 대한 허용지지력의 50%로 감소하여 적용(추가 동하중을 정하중의 100%로 간주)한 극히 보수적인 설계가 이루어지고 있는 실정이다.

본 연구의 목적은 모형 진동기계 얇은기초를 고안·제작하고, 연직 기계진동으로 인하여 정하중외에 추가적으로 발생하는 동적하중의 정량적 크기를 평가하기 위한 모형실험 방안을 제시하는 데에 있다. 아울러 제안된

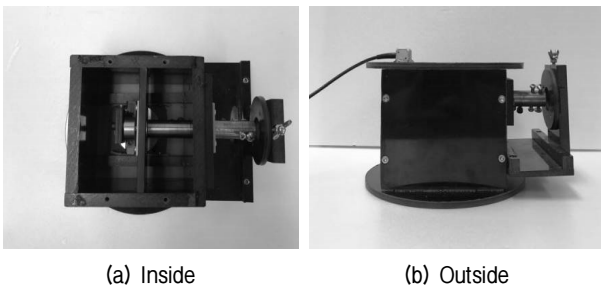


Fig. 2. Model vibration machine foundation

기법을 중간 조밀도의 모래 기초지반에 놓인 기계진동 얇은기초의 기계진동에 의해 발생하는 추가적인 동하중의 정량적 크기를 평가해 보고, 국내에서 제시한 기초의 연직지지력 검토 시, 연직방향 등가 동적 설계력을 정하중의 25~50% 이상으로 간주하도록 제시하고 있는 설계방법의 타당성을 검토해 보았다.

2. 진동기계 얇은기초 실내 모형실험 개요

2.1 모형 진동기계기초

본 연구에서 제작한 모형 진동기계기초의 하우징(housing)을 비롯한 구성 자재 대부분의 재질은 베크라이트(bakelite)인데, 베크라이트는 열경화성 수지로 굴곡강도와 내열성이 우수한 재료이다.

Boominathan과 Lakshmi(2000), Baidya와 Muralikrishna(2001), Manna와 Baidya(2010), Bhowmik 등(2016)의 연구들에서, 제작된 Lazan type의 진동기계기초가 연직방향의 진동을 발생시키는 것으로 기술되어 있으나, 제작 및 내부구조에 대한 자세한 설명이 없어 기술된 내용을 참고하고, 여러 번의 시행착오를 거쳐 연직 진동이 작동될 수 있도록 모형 진동기계기초를 자체적으로 고안·제작하였다(Fig. 2 참조).

모터(Motor)의 구동력은 flexible shaft를 통해 진동기로 전달되도록 하였다(Fig. 3). Fig. 3의 velocity controller 중앙에 위치한 조절기를 조절하면, 범위 내의 원하는 진동주파수 하에서 실험이 가능한데, 범위는 0~1200rpm이며, 이는 주파수로는 0~20Hz에 해당된다.

Velocity controller에 부착되어 있는 flexible shaft를 진동기계기초에 연결하여 진동주파수를 조절, 동작시키면 flexible shaft를 통해 기초의 내부 중앙부가 시계방향으로 회전하면서, 연결되어 있는 추가 하부로 연직운동을 하여 진동이 발생하는 원리이다(Fig. 4 참조).

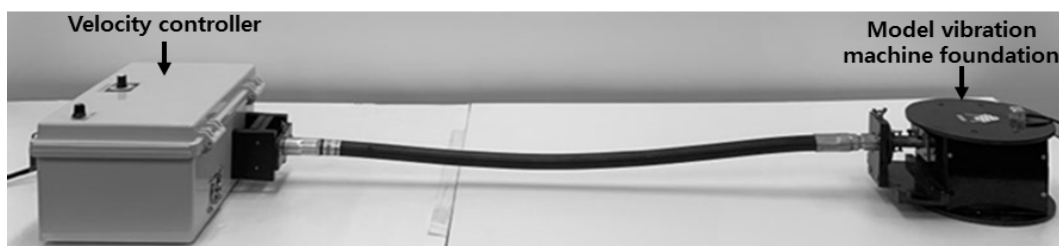


Fig. 3. Velocity controller and model vibration machine foundation

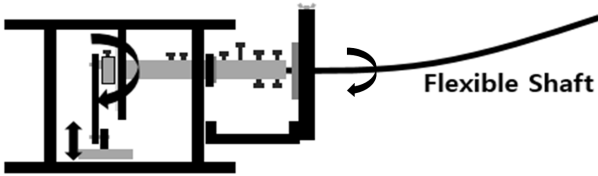


Fig. 4. Basic principle of motion of model vibration machine foundation

2.2 모형지반 조성

모형토조는 500×500×500mm의 크기로 제작하였다. 지반조성에 사용된 시료는 주문진표준사이며, 실험을 통해 획득한 주문진표준사의 기본 물성값은 Table 1과 같다.

지반은 5층 다짐으로 상대밀도를 약 60%로 구성하였

으며, 이는 보통상태의 조밀도를 갖는 모래지반에 해당된다. 본 실험 전 기초실험의 일환으로 모형토조 벽면의 반사파 영향 실험을 수행하고, 이를 근거로 반사파 영향을 최소화하기 위하여 토조 벽면에 1cm의 코르크판을 부착하였다(Fig. 5 참조). 본 실험 전 기초실험으로 반사파 영향 검토 실험을 수행하였다. 실험 시 모형토조벽에 코르크판을 부착하여 부착 유무에 따른 지반 내의 중앙부와 벽면과 가까운 위치에서의 가속도 측정결과를 비교하였다. 지반 내 가속도계는 5층 다짐 중 4층을 다진 후 다짐 층 중앙부와 중앙부와 벽면의 중간위치에 각각 하나씩 매설하였다(Fig. 6 (a) 참조). 기계진동에 따른 추가 동하중 산정 실험 시 토압계, 변위계, 가속도계를 설치하였다. 토압계는 기초하부면 중앙에 부착하였고, 변위계는 기초 중앙 상부에 설치하였다. 가속도계는 5층

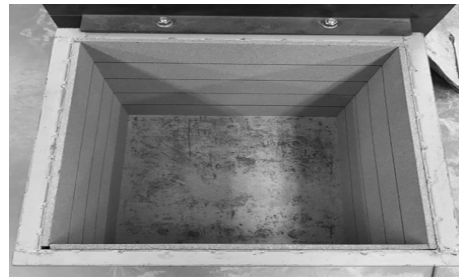
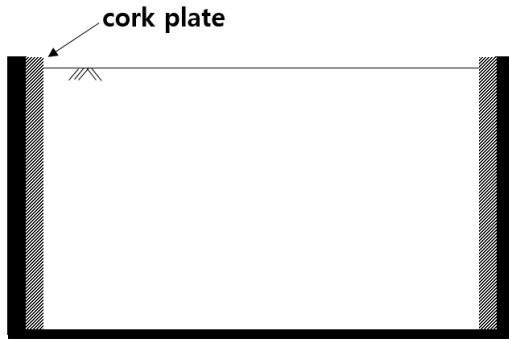
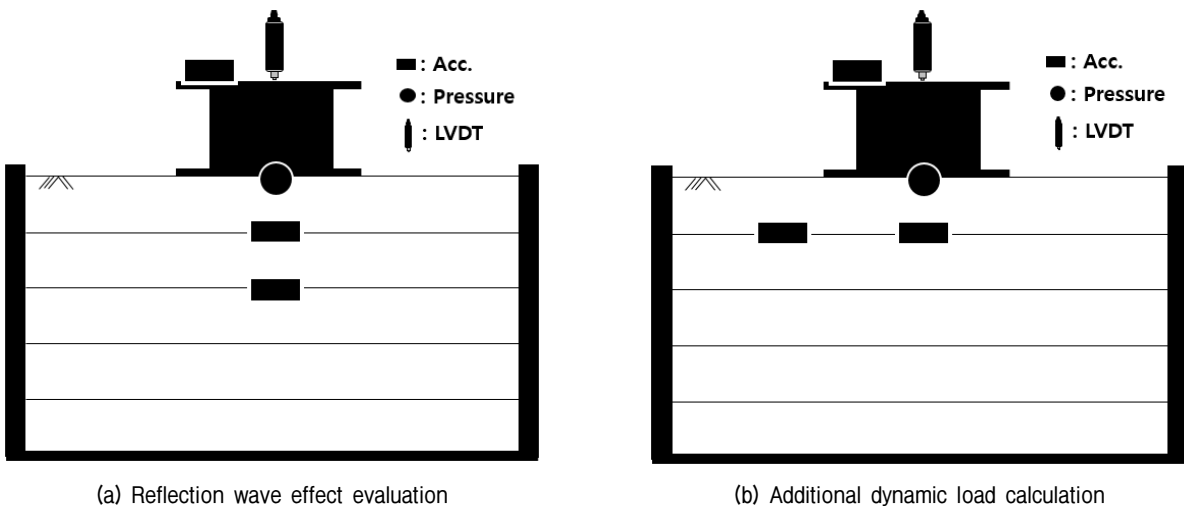


Fig. 5. Model soil box attached by cork plate



(a) Reflection wave effect evaluation

(b) Additional dynamic load calculation

Fig. 6. Instrument layout

Table 1. Material properties of model ground soil

Max. dry density	Min. dry density	Specific gravity	Angle of internal friction	Cohesion
1.61 g/cm^3	1.36 g/cm^3	2.64	36°	3 kPa

다짐 중 3층 중앙과 4층 중앙부에 각각 하나씩 매설하였다(Fig. 6 (b) 참조).

2.3 실험 내용 및 방법

본 실험에 앞서 기초실험으로 반사파 영향 검토 실험과 고유진동수 산정 실험을 우선 수행하여 각각의 실험 결과로부터 본 실험의 모형실험으로서의 타당성 확인과 본 실험의 실험 주파수를 선정에 활용하였다.

진동기가 진동을 정상적으로 가할 수 있게, 기초상부에 올릴 수 있는 최대 무게를 고려한 모형 진동기계 기초의 최대 상재압의 크기가 5kPa인 것을 감안하여 실험 시 상재압은 2.59kPa과 4.47kPa의 두 가지로 한정하였다.

제작한 모형토조의 크기가 제한적인 상황에서, 진동으로 발생할 수 있는 지반 내의 진동파의 토조벽면에 대한 반사파 영향을 검토하고자, 토조벽면에 1cm 두께의 코르크판 부착 유무에 따른 비교 실험을 수행하였다. 실험은 진동주파수 10Hz, 상재압은 2.59kPa과 4.47kPa 하에서 수행하였다. 계획한 위치에서 코르크판 부착 전·후의 각 위치에서 계측된 가속도 기록을 FFT분석하여 반사파 영향 여부를 검토하였다.

본 연구의 모형실험에서 순수하게 진동주파수에 따른 기계진동기초에 가해지는 추가적인 동하중을 검토하기 위해서는, 모형 지반시스템의 공진의 효과를 배제하여야 한다. 그러므로 기초실험 차원에서, 모형 지반시스템의 고유진동수를 추정하고, 해당 고유진동수를 포함하지 않는 실험 주파수를 선정하여 이를 본 실험에 적용하였다. 상재압 2.59kPa과 4.47kPa 하에서, 0~2초 진동구간은 주파수 15Hz로 진동을 가하였고, 2초~5초 구간은 진동을 중지하여 시스템이 자유진동하도록 유

도하였다. 각각의 상재압에 대하여 2번의 반복 실험 후, 자유진동 구간 중 3~4초 구간의 연직변위 시간이력 기록을 발췌, FFT분석하여 고유진동수를 산정하였다.

두 가지의 기초실험을 수행하고, 그 결과를 바탕으로 다음과 같은 본 실험을 수행하였다. 기계진동에 따라 추가적으로 발생하는 동하중을 산정하고자 고안·제작한 모형 진동기계기초 상부에 하중을 올려 상재압만큼 토압계가 일정한 정하중에 도달함을 확인한 후, 2.59kPa과 4.47kPa의 두 가지 상재압 하에서 진동주파수를 각각 5Hz, 10Hz, 15Hz, 20Hz로 하여 진동을 3초간 가한 실험을 수행하였다. 이러한 실험을 3회 반복하고 실험 결과를 분석하여 추가 동하중과 추가 동하중 발생률을 산정하였다(Table 2 참조).

3. 진동기계 얽은기초 모형실험 결과

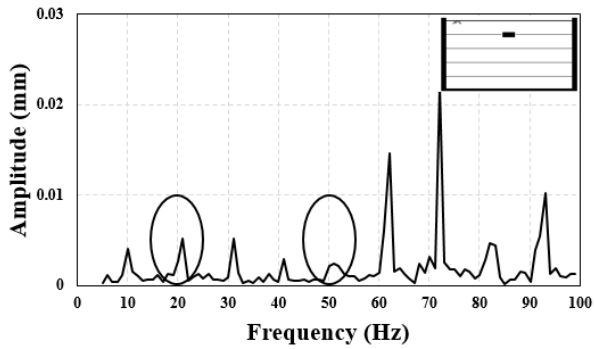
3.1 모형토조 반사파 영향 분석 실험 결과

Fig. 7은 상재압 4.47kPa 하에서 코르크판 부착 유무에 따른 기계진동(주파수는 10Hz)에 따른 토조 중앙부에서 계측된 가속도의 FFT분석 그래프 예이다. 기계진동 시 토조 중앙부에서 계측된 가속도 기록의 FFT결과는 코르크판 유무에 상관없이 비슷한 결과를 보였다. 특히, 20Hz와 50Hz의 주파수 성분이 나타나, 약하게 드러나며 특히 50Hz 성분은 크게 두드러지지 않는 특색을 나타냈다. 이로부터 토조 중앙부는 기계진동에 의한 반사파의 영향이 코르크판 유무에 상관없이 크지 않는 것으로 판단되었다.

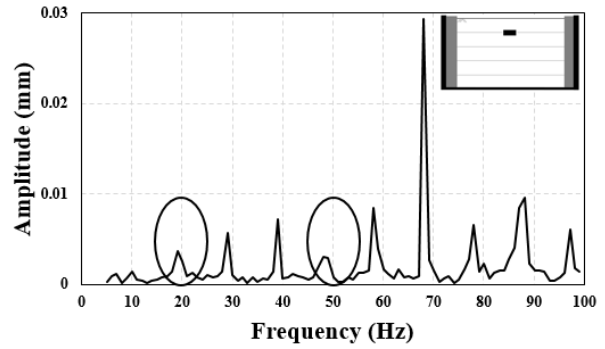
Fig. 8은 상재압 4.47kPa 하에서 코르크판 부착 유무에 따른 기계진동에 따른 토조 측면부에서 계측된 가속도의 FFT분석 그래프 예이다. 그림에서 코르크판을 부

Table 2. Mechanical vibration model test condition

	Basic experiment		Main experiment
	Reflection wave effect evaluation	Evaluation of natural frequency	Calculate additional dynamic load
Pressure (kPa)	2.59 / 4.47	2.59 / 4.47	2.59 / 4.47
Frequency (Hz)	10 (600 rpm)	15 (900 rpm)	5 (300 rpm) 10 (600 rpm) 15 (900 rpm) 20 (1200 rpm)
Time (sec)	1	2 (Forced vibration) 3 (Free vibration)	3
Number of times	3	2	3

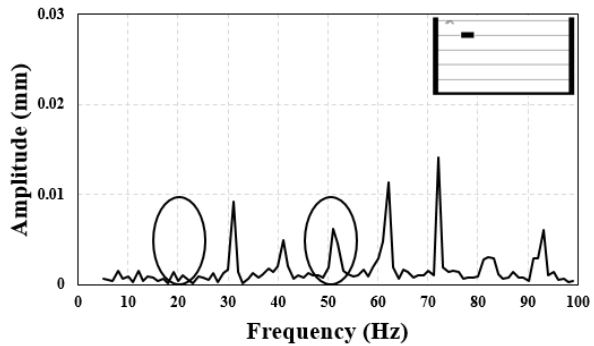


(a) No cork plate

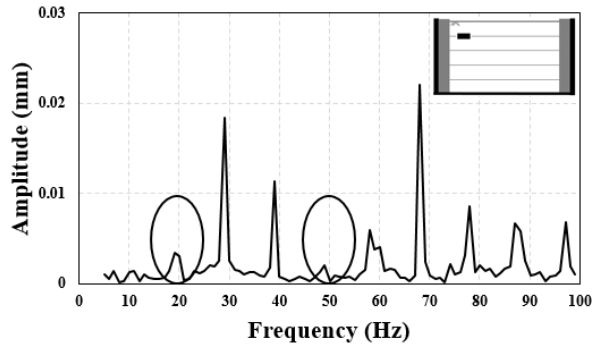


(b) Cork plate attachment

Fig. 7. Fourier amplitude of acceleration measured under the foundation



(a) No cork plate



(b) Cork plate attachment

Fig. 8. Fourier amplitude of acceleration measured at the point between center line and box wall

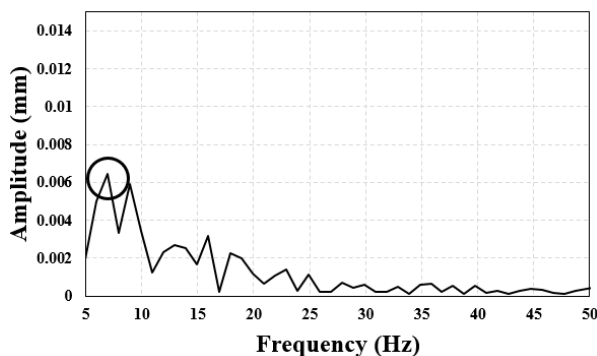
착하지 않은 토조에서 획득한 가속도의 FFT분석결과는 중앙부에서 획득한 결과(Fig. 7)와는 달리 20Hz 주파수 성분이 손실되고 50Hz 성분이 비정상적으로 두드러지는 양상을 보인 반면, 코르크판이 부착된 토조에서 획득한 실험결과는 20Hz성분과 50Hz성분 부근에서의 주파수 특성이 토조 중앙부에서 관측된 결과의 분석결과와 거의 유사한 것을 확인할 수 있었다.

이로부터, 토조 측면에 코르크판을 부착하지 않는 경

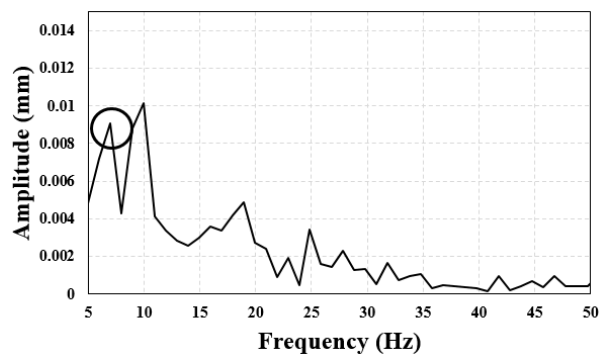
우, 기계진동실험 시 토조 벽면의 반사파의 영향이 발생할 수 있음을 확인하였고, 이러한 반사파의 영향은 본 실험에서 강구한 코르크판을 토조 측면에 부착함으로써 최소화할 수 있는 것으로 판단할 수 있었다.

3.2 기초-지반 시스템 고유진동수 실험 결과

Fig. 9는 상재압 4.47kPa에서 기초의 연직변위 시간



(a) Pressure 2.59 kPa



(b) Pressure 4.47 kPa

Fig. 9. Estimation of natural frequency

이력 중 3초~4초 사이의 자유진동 연직변위 시간이력을 발췌하여 FFT분석한 것이다. 상재압 2.59kPa일 때와 상재압 4.47kPa일 때 모두 모형 기초-지반 시스템의 고유진동수는 약 7.2Hz로 추정하였다.

본 실험결과로부터, 모형 기초-지반 시스템의 고유진동수가 약 7.2Hz로 추정되어, 본 실험 시 이러한 모형시스템의 공진에 의한 효과를 배제하고자, 실험 시 주파수를 해당 주파수대역을 배제하고 5, 10, 15, 20Hz로 선정하였다.

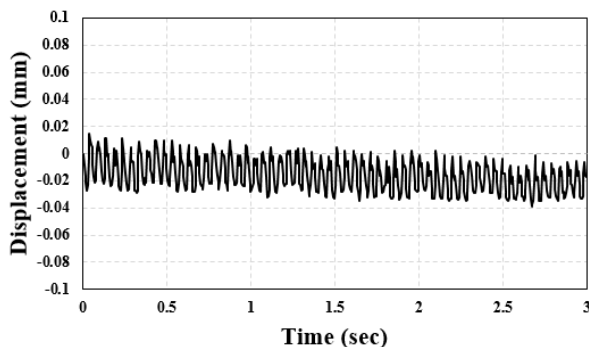
3.3 기계진동에 따른 추가 동하중 산정 결과

Fig. 10은 기계진동에 따른 추가 동하중 산정 실험에서, 모형 진동기계기초에 대한 연직변위 시간이력 결과 중 진동주파수 20Hz인 경우를 예로 보여준 것이다.

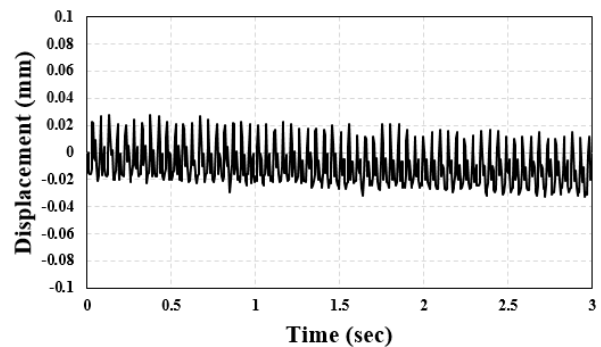
Fig. 11은 추가 동하중 산정 실험 시 모형 진동기계기초에 발생한 진동주파수에 따른 추가 동하중 시간이력 결과 중 진동주파수 15Hz인 경우를 예로 보여준 것이다.

진동기계기초의 해석결과, 기계 작동 중 진동의 진폭은 허용기준치 이내이어야 하는데, 구조물기초설계기준

해설(KGS, 2018)에서는 회전속도 1,500rpm인 고속회전형 기계기초에 대한 기초의 허용진동폭을 0.04~0.06mm로 규정하고 있다. 실내 모형실험 시 300rpm, 600rpm, 900rpm, 1,200rpm 즉, 5Hz, 10Hz, 15Hz, 20Hz의 진동주파수 실험을 하였는데, 진동주파수 10Hz, 15Hz, 20Hz의 기계진동 시 진동에 의한 변위폭의 평균은 0.04~0.06mm로 규정 내에서 실험이 이루어진 것을 확인할 수 있었다. 반면 진동주파수 5Hz의 실험결과, 상재압 2.59kPa일 때의 변위폭의 평균은 0.083mm, 상재압 4.47kPa일 때의 변위폭의 평균은 0.023mm로 규정에서 벗어나는 결과를 보였다(Table 3 참조). 구조물기초설계기준해설(KGS, 2018)에서는 작동속도가 300rpm 이하인 저속기계의 기초는 적어도 작동속도의 2배 이상인 고유진동수를 갖도록 설계를 추천하는데, 실험 시 진동주파수 5Hz는 300rpm에 해당되며, 기초-지반 시스템의 고유진동수가 7.0Hz~7.5Hz로 추정된 것을 감안한다면, 공진현상을 배제하고자하는 방안으로 다른 주파수대의 진동주파수를 선정하였지만 실험결과로 보았을 때 진동주파수 5Hz에서의 결과는 모형 진동기계기초의 공진영향이 일부 반영되어 나타난 결과로 추정된다.

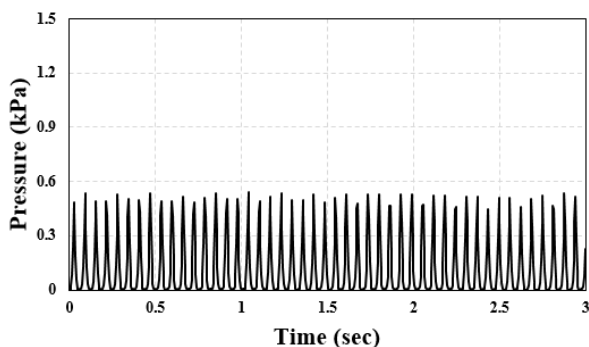


(a) Pressure 2.59 kPa

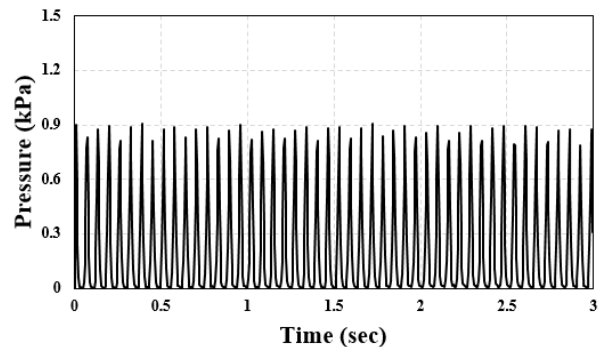


(b) Pressure 4.47 kPa

Fig. 10. Vertical displacement time history (f=20 Hz)



(a) Pressure 2.59 kPa



(b) Pressure 4.47 kPa

Fig. 11. Additional dynamic load time history (f=15 Hz)

Table 3. Vertical displacement of model vibration machine foundation

	Pressure (kPa)	Vertical displacement (mm)			
		Test 1	Test 2	Test 3	Ave.
5 Hz	2.59	0.08	0.08	0.09	0.083
	4.47	0.02	0.03	0.02	0.023
10 Hz	2.59	0.07	0.05	0.04	0.053
	4.47	0.05	0.04	0.03	0.04
15 Hz	2.59	0.04	0.05	0.05	0.047
	4.47	0.07	0.04	0.05	0.053
20 Hz	2.59	0.06	0.04	0.04	0.047
	4.47	0.09	0.05	0.04	0.06

Table 4. Additional dynamic load of model vibration machine foundation

	Pressure (kPa)	Additional dynamic load (kPa)				Dynamic load generation rate (%)			
		Test 1	Test 2	Test 3	Ave.	Test 1	Test 2	Test 3	Ave.
5 Hz	2.59	1.01	0.55	0.81	0.79	39	21.2	31.3	30.5
	4.47	1.39	1.15	1.46	1.33	31.1	25.7	32.7	29.8
10 Hz	2.59	0.58	0.57	0.54	0.56	22.4	22	20.8	21.6
	4.47	1.04	0.97	1.17	1.06	23.3	21.7	26.2	23.7
15 Hz	2.59	0.57	0.54	0.54	0.55	22	20.8	20.8	21.2
	4.47	1.15	0.82	0.91	0.96	25.7	18.3	20.4	21.5
20 Hz	2.59	0.59	0.49	0.45	0.51	22.8	18.9	17.4	19.7
	4.47	0.93	0.78	0.88	0.86	20.8	17.4	19.7	19.2

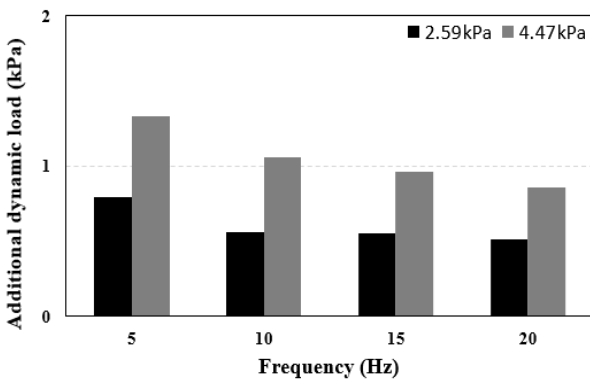


Fig. 12. Additional dynamic load by frequency

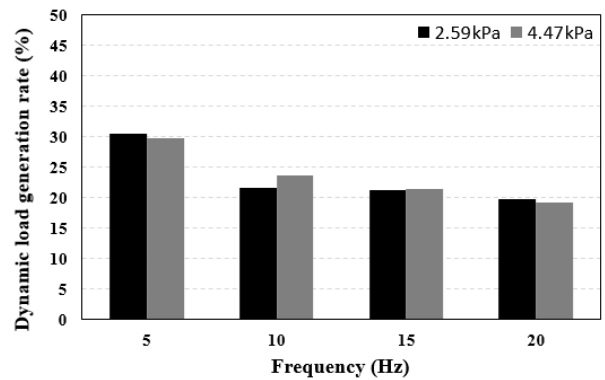


Fig. 13. Dynamic load generation rate by frequency

기계진동 시 진동주파수에 따라 발생한 정하중에 대한 추가 동하중 시간이력 그래프를 분석하여 추가 동하중과 추가 동하중 발생률 결과를 Table 4에 정리하였다.

Fig. 12와 Fig. 13은 상재압 2.59kPa과 상재압 4.47kPa 하에서 기계진동에 따른 추가 동하중의 크기와 추가 동하중 발생률을 각각 나타낸 것이다. 그림으로부터, 기계진동 실험 시 기초에 추가 동하중이 발생하나 그 값의 평균이 최대 30% 이내였으며 기초를 표현한 진동기계 기초의 무게(압력) 또는 접지압의 크기에 대해 정하중에 대한 추가 동하중의 증가율은 큰 차이가 없었고, 오

히려 진동주파수의 영향을 더 크게 받았다. 즉, 진동주파수가 커질수록 추가 동하중의 발생률(추가 동하중/정적 상재하중)은 감소하는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 현재 국내 실무에서 적용 중인 진동기계 기초의 설계에 있어서, 진동에 의한 영향을 고려하여 정하중의 추가적인 동하중을 정하중의 50%까지 산정하는 방법의 타당성을 검토해 보기 위해 진동기계 얇은기

초 실내모형실험을 실시하였고, 실험결과 분석으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 본 연구에서는 모형 진동기계기초를 연직방향으로 진동시키고자 하는 방안으로 선행되었던 모형실험 관련 연구를 참고하고, 여러 번의 시행착오를 거쳐 연직 기계진동을 기계식으로 가할 수 있는 모형 진동기계기초를 자체적으로 고안·제작하였다.
- (2) 본 실험 전 기초실험으로서, 제한된 크기의 모형토조 내에서의 반사파 영향 분석 실험과 제작한 모형 기초-지반 시스템의 고유진동수 평가 실험을 수행하였다. 기계진동실험 시 토조 벽면의 반사파의 영향을 분석하고 코르크판을 토조 측면에 부착함으로써 실험 시 반사파의 영향을 최소화 할 수 있는 방안을 마련하였다. 제작한 모형 기초-지반 시스템의 고유진동수를 산정하여, 본 실험 시 모형시스템의 공진에 의한 효과를 배제할 수 있는 적합한 실험 진동주파수를 선정하였다.
- (3) 본 연구에서 실시한 실내모형실험의 결과에 한한다면 진동기계 얽은기초는 기계 진동에 의한 정적인 하중 외에 추가적인 동하중이 발생하나, 그 크기는 정하중의 30% 이내인 것으로 나타났으며, 진동주파수가 커질수록 동하중의 발생률(추가 동하중/정적상재하중)은 감소하는 것으로 나타났다.
- (4) 본 연구에서 조성한 지반은 보통 조밀한 정도의 모래지반에 속하며, 제작한 모형 진동기계기초가 진동을 정상적으로 가할 수 있게, 기초상부에 올릴 수 있는 최대 무게를 고려한 모형 진동기계기초의 최대 상재압의 크기가 5kPa인 것을 감안하여 실험이 이루어졌다. 본 연구결과를 기초로 한다면 허용지지력을 정적 허용지지력의 최대 약 77%로 낮게 보는 것이므로 50% 수준까지라면 이보다 더 좋지 않은 지반 조건이 되고, 사실상 이러한 지반조건에서는 얽은기초 자체를 설계하지 않는다는 점을 감안한다면 진동에 의한 영향을 고려하여 정하중외 추가적인 동하중을 정하중의 50%까지 산정하는 방법은 매우 보수적인 설계임을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행 되었습니다(과제번호 20SCIP-C151438-02).

참고문헌 (References)

1. Arya, S.C., O'Neill, M.W., and Pincus, G. (1984), "Design of Structures and Foundations for Vibrating Machines", Gulf Publishing Company, Houston, Texas.
2. Baidya, D.K. and Muralikrishna, G. (2001), "Natural Frequency of Vibrating Foundations on Layered Soil System-An Experimental Investigation", *International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Paper No.2.02.
3. Bhowmik, D., Baidya, D.K., and Dasgupta, S.P. (2016), "A Numerical and Experimental Study of Hollow Steel Pile in Layered Soil Subjected to Vertical Dynamic Loading", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 85, pp.161-165.
4. Boominathan, A. and Lakshmi, T. (2000), "Dynamic Characteristics of Pile Group under Vertical Vibration", *The 12th World Conference on Earthquake Engineering*, pp.1-8.
5. Ha, I.S. and Han, J.T. (2016), "Evaluation of the Allowable Axial Bearing Capacity of a Single Pile Subjected to Machine Vibration by Numerical Analysis", *International Journal of Geo-Engineering*, Vol.7, No.1, 22, pp.1-12.
6. Han, J.T., Kwon, S.Y., Ha, I.S., and Kim, U.G. (2013), "Evaluation on Bearing Capacity for Machine Foundation in Plant considering Dynamic Load", *The 39th Conference Proceedings of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, pp.2775-2778 (in Korean).
7. KGS (2018), *Manual of Foundation Design Criteria*, Korean Geotechnical Society, pp.863-892 (in Korean).
8. Korea Institute of Construction Technology (2014), "Development of Evaluation Technology on Bearing Capacity of Foundation for Vibrating Machines in Plant", Research Report, KICT (in Korean).
9. Lee, J.S. (2014), "Estimation on 3-D Numerical Modeling of a Floasting Single Pile subjected to Machine Vibration", Master's Thesis, Kyungnam University (in Korean).
10. Manna, B. and Baidya, D.K. (2010), "Dynamic Nonlinear Response of Pile Foundations under Vertical Vibration—theory Versus Experiment", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(6), pp.456-469.
11. Novak, M. and F. Grigg, R. (1976), "Dynamic Experiments with Small Pile Foundations", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.13, No.4, pp.372-385.

Received : November 2nd, 2020

Revised : November 5th, 2020

Accepted : November 5th, 2020