

진동대 반력기초의 진동사용성 평가

The Vibration Comfort Evaluation of the Shaking Table Mass Foundation

최형석¹⁾ · 정다정²⁾ · 김성도³⁾ · 정진환⁴⁾

Choi, Hyoung Suk · Jung, Da Jung · Kim, Seong Do · Cheung, Jin Hwan

국문 요약 >> 최근 구조물의 사용성이 설계시 중요한 항목으로 대두되면서 구조물의 안전성 뿐만 아니라, 구조물 내 거주자 및 고가의 장비에도 영향을 주는 기계진동을 저감시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 기계진동은 기초의 질량과 가진 질량의 비로 나타낼 수 있는 질량비에 의존하게 되는데, 이러한 질량비는 사용성 기준에서 제시한 구조물의 가속도 허용치 내에서 결정할 수 있다. 본 논문에서는 진동 사용성에 대한 문제를 해결하기 위해 수치적인 접근과 실제 구조물의 적용성을 검증하고, 대형 진동대 장비가 설치된 시설에 적용하여 실험한 해석적 연구를 바탕으로 인체진동특성에 대한 사용성을 평가함과 동시에 최적의 질량비를 확인하였다. 단자유도로 수치 해석한 결과값은 실제 구조물을 유한요소 해석한 결과와 잘 부합하여 Spring-Damper Model로 이상화하는 것이 유효한 것으로 판단되었다. 또한 ISO 2631 기준에서 제시한 사용성 한계인 0.8 m/sec^2 과 비교한 결과, 실제 구조물의 자중을 고려한 진동대와 콘크리트 기초의 최적 질량비는 0.013이하여야 함을 확인하였고, 예제 실험 시설은 진동실험에 대해 적정질량비를 가지고 있음을 확인하였다.

주요어 ISO 2631, 진동 사용성, 질량비, 기계기초, 진동대

ABSTRACT >> When designing building structures, dynamic serviceability is one of the most important items. Much research is being carried out on machine vibrations that affect inside residents and expensive equipment in the building structure. The vibration effect generally depends on the mass ratio, and an adequate mass ratio is determined by comparison with the serviceability limit according to the criteria. This study investigates the evaluation of vibration serviceability by using ISO 2631 to confirm the propriety of adequate mass ratios and it is verified that the application of a complicated FE model to model the real large shaking table facility with the mathematical model simulated as a SDOF system. The weighted RMS value is then compared with the comfort limit given by ISO 2631. As a result, the analysis of the numerical model is consistent with analysis of the FE model. Moreover, it is found that the adequate mass ratio of the concrete foundation and shake table, considering the self-weight of the real facility, should be less than 0.013. It is also confirm that the sample facility is satisfies the requirement of an adequate mass ratio.

Key words ISO 2631, Vibration comfortness, Mass ratio, Machine foundation, Shaking table

1. 서론

최근 구조물의 사용성이 설계시 중요한 항목으로 대두되면서 진동에 따른 구조물의 영향과 안정도에 대한 관심이 증대되고 있다. 다양한 진동하중에서 발생하는 물리적인 충격 및 진동과 같은 자극이 지속적 또는 반복적일 경우에는

구조물의 안전성뿐만 아니라 진동에 의한 불쾌감을 조성하여 노출된 인체의 건강 및 임무수행 능력을 저하시킬 수 있다. 그러므로 다양한 진동하중을 받는 경우에 구조물의 구조적인 내구성에 문제가 없더라도 진동 사용성을 검토할 필요가 있다.¹⁾ 구조물 내 거주자 및 고가의 장비에도 영향을 주는 기계진동은 기초의 질량과 가진 질량의 비로 나타낼 수 있는 질량비에 의존한다. 기계진동을 저감시키기 위해 적절한 질량비를 결정하기란 가장 중요한 문제임과 동시에 진동기계를 보유한 건물을 설계함에 있어 어려운 문제로 작용한다. 낮은 질량비에서는 시스템의 공진을 만들 수 있고, 높은 질량비를 가진 구조물을 만들기 위해서는 건설비용이 증가 될 수 있다. 이와 관련하여 구조물 내 사용자가 느끼는 인체진동에 대한 인지강도를 판별하는 정량적인 척도를 확

¹⁾ 정회원·부산대학교 KOCED 지진방재연구센터, 연구원
(교신저자: engineer@pusan.ac.kr)

²⁾ 부산대학교 사회환경시스템공학과 토목공학전공, 석사과정

³⁾ 경성대학교 토목공학과, 정교수

⁴⁾ 정회원·부산대학교 사회환경시스템공학부 토목공학전공, 정교수

본 논문에 대한 토의를 2011년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2010. 11. 9 / 수정일 : 2011. 1. 28 / 게재확정일 : 2011. 2. 8)

립하는 연구 등이 활발히 진행되고 있으며, 해외 각국에서는 여러 연구 결과를 바탕으로 진동허용한계를 설정하여 구조물의 가속도 응답이 허용치 이하가 되도록 할 것을 권고하고 있다.⁽²⁾ 그러나 현재 국내에서의 구조물의 진동에 대한 사용성 평가방법은 최근에 들어서야 관심이 모아지고 있으며, 체계화된 설계기준이 제정되어 있지 않아 국외의 기준을 준용하고 있는 실정이다.

따라서 진동기초를 설계하는 경우, 구조물의 안정성에 대한 문제 외에 진동 사용성에 대한 문제를 해결하기 위해서 수치적인 접근과 최적의 질량비를 확인할 필요가 있다. 본 논문에서는 진동 사용성을 평가하기 위하여 대형 진동대 실험시설을 갖춘 실제 구조물을 모델링한 복잡한 유한요소모델과 단자유도로 이상화한 수치적 모델을 비교하여 적용성을 검토하고, 해석적 연구결과를 바탕으로 진동특성에 대한 안정성 및 사용성을 평가하였다.

2. 기계기초진동에 대한 인체평가기준

2.1 국내외 진동영향 사용성평가 기준

현재 구조물에서 발생하는 진동이 인체에 미치는 영향에 대한 관련 연구가 부분적으로 수행되고 있으며, 우리나라에서는 (철도)교량구조물, 기계진동을 받는 구조물, 초고층 건축물 등 다양한 구조물에 대하여 이루어지고 있다. 철도교량구조물에 관한 진동 사용성 평가⁽³⁾에서는 측정된 가속도 신호에 ISO기준에서 채택된 FWF(Frequency Weighting Filter)를 적용하고 진동지속시간에 따라 변동이 심한 진동 신호에 VDV(Vibration-Dose-Value)를 활용한다. 또한 기계진동을 받는 구조물의 사용성을 평가⁽⁴⁾하는 과정에서는 ISO지침을 근간으로 하여 작성된 일본건축학회의 거주 성능평가지침을 이용하고 있다.

이 밖에 인체진동을 평가함에 있어 국제표준규격인 ISO(International Standards Organization), BS(British Standards), DIN(Deutsches Institut Fur Normung-Germ an National Standard) 기준을 주로 사용하고, BS 6841과 DIN 4150 등은 ISO 2631에서의 진동평가곡선을 기본으로 하여 진동 평가방법을 구성하고 있으며, 해외 각국의 진동평가기준에 응용되고 있다.⁽⁵⁾

ISO 2631-2(1989)에서는 건물의 용도와 진동의 유형에 따라 사람의 인지에 대한 등가 기준 곡선에 적용할 수 있는 증폭 계수의 범위를 제시하고 있으며, 한국표준규격, KS B 0710-2는 이를 기술적 내용 및 규격을 변경하지 않고 그대로 번역, 작성되어있다.

2.2 진동 사용성 평가방법의 적용

구조물과 접촉되어 있는 장비에 의해 진동이 발생하여 구조물에 전달되는 경우 동일한 기초에 서있거나 앉아있는 등의 자세에 따라 인체에 대한 영향을 고려하는 진동 사용성이 만족되어야 한다. 해외 각국에서는 다양한 연구 결과를 바탕으로 진동허용한계를 설정하여 진동원의 종류와 진동이 직접적으로 전달되는 대상에 따라 진동 평가 기준을 달리 제시하고 있다.⁽⁶⁾ 인체진동을 평가함에 있어서는 국제표준규격인 ISO 2631, BS 6841, DIN 4150 기준을 주로 사용한다. ISO와 DIN의 규정은 건물의 용도와 인간의 진동지각에 대하여 상당히 체계적인 제한기준을 정하고 있으며 비교적 정확한 진동평가 결과를 제시하고 있다.⁽⁷⁾ 따라서 본 논문에서는 진동이 구조물에 전달되는 경우, 구조물 내부에 위치한 인체에 대한 영향을 평가하기 위해 적용할 수 있는 ISO기준을 사용하였다. ISO 2631-part 1은 일반적인 구조물에서 대상 인체의 일반적인 자세들에 대하여 적용이 가능하다. ISO 2631-part 2에서는 진동에 대한 불쾌감 등 사람의 반응 정도를 수치적으로 나타낸 등가 반응 곡선을 진동이 전달되는 인체 축에 대하여 가속도와 속도로 제시하고 있다. 또한, part 2의 권고안에서는 구조물 내부에 위치한 사람에 대한 평가 방법으로써 적용 인체의 경계조건인 영향을 고려하지 않으므로, 적용 인체의 자세를 결정할 수 있다면 part1의 방법을 사용하도록 하고 있다. 따라서 본 연구에서는 ISO 2631-1 기준을 바탕으로 발생하는 진동에 대하여 실제 구조물의 사용성을 평가하고자 한다. 또한 일반적으로 연속되는 진동이 발생하는 구조물에서 사용자는 앉아 있거나 누워있는 경우가 적으므로 인체가 가장 민감하게 반응하는 경우인 진동이 전달되는 기초 위에 적용 대상이 서있는 경우, 기계진동이 수평방향으로만 가진된다고 가정하여 연구를 진행하였다. ISO 2631-1(이하 기준)에 의한 진동평가 방법은 먼저, 적용대상 인체의 경계조건을 결정하고 결정된 조건에 따른 가속도 측정위치 및 방법을 선정하여 측정을 실시한다. 측정된 가속도 응답의 변동정도에 따라 가중화된 가속도의 RMS(Root-Mean-Square)에 의한 평가를 실시하여 기준에서 제시하고 있는 진동에 대한 인지한계값과 비교하여 평가하게 된다. 기준에서 제시하고 있는 반응의 각 한계값은 표 1과 같다.

사용자의 건강, 안락함, 인지 및 멀미 등에 미치는 진동의 일차적인 인자는 인체에 전달되는 진동의 주파수 성분이다.

$$|H_h(s)| = \left| \frac{1}{1 + \sqrt{2} w_1/s + (w_1/s)^2} \right| = \sqrt{\frac{f^4}{f^4 + f_1^4}} \quad (1)$$

〈표 1〉 각 단계별 진동 인지 한계

반응정도	편안하다	약간 불편하다	다소 불편하다	불편하다	매우 불편하다	극히 불편하다
평가한계 (m/sec ²)	0.315	0.315 ~ 0.63	0.5 ~ 1.0	0.8 ~ 1.6	1.25 ~ 2.5	2.0 초과

$$|H_i(s)| = \left| \frac{1}{1 + \sqrt{2} s/w_2 + (s/w_2)^2} \right| = \sqrt{\frac{f_2^4}{f^4 + f_2^4}} \quad (2)$$

$$|H_i(s)| = \left| \frac{1 + s/w_3}{1 + s/(Q_4 w_4) + (s/w_4)^2} \right| \quad (3)$$

$$= \sqrt{\frac{f^2 + f_3^2}{f_3^2}} \sqrt{\frac{f_4^2 Q_4^2}{f^4 Q_4^2 + f^2 f_4^2 (1 - 2Q_4^2) + f_4^2 Q_4^2}}$$

$$H(s) = H_h(s) * H_i(s) * H_l(s) \quad (4)$$

그러므로 인체에 큰 영향을 줄 수 있는 진동수, 특히 저주파 진동을 평가하기 위해서 측정된 주파수를 가중시켜 평가하는 것이 필요하다. 기준에서는 인체의 진동에 대한 자세 등의 경계조건과 전달 방향에 따라 다른 주파수 가중치를 적용하고 있다. 이러한 평가를 위하여 가속도 값의 계산은 진동자체에서 발생한 가속도를 각 축에 해당하는 주파수가중인자(Weighting Factor)를 곱하여 최종적으로 가중 가속도 값(Total Weighted Acceleration)으로 환산하였다.

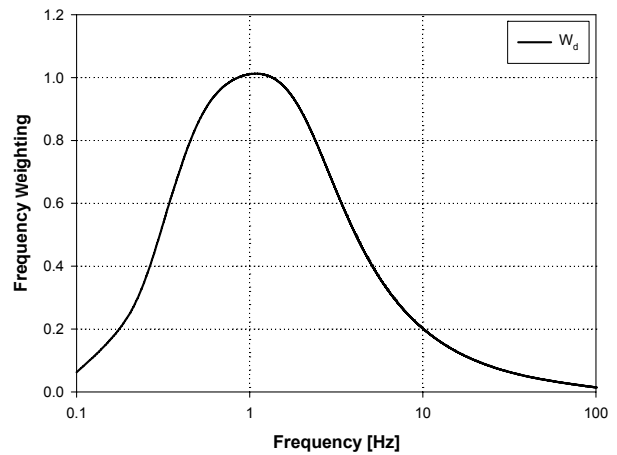
본 논문에서 사용되는 주파수 가중 함수 W_d 는 서있는 자세일 때 사용되는 것으로써, 옥타브당 -12dB의 점근 기울기 선을 가지고 있는 Butterworth 특성으로 각각 2개의 pole을 가진 고주파 통과 필터와 저주파 통과 필터에 의해 수행되는데 이 필터의 특성은 다음의 전달함수로 나타낼 수 있다. 식 (1-3)은 각각 High-pass Filter, Low-pass Filter, 순수 가중치 특성을 가진 전달함수이며, 전체 가중함수는 식 (4)로 나타낼 수 있다. 여기서 $H(s)$ 는 통과 필터의 진동수 응답, w 는 고유 각진동수, f 는 저주파 통과 설정 주파수, Q 는 공진값, s 는 Laplace Variable이며, 각 전달함수의 매개변수는 표 2와 같다. 그림 1은 주파수 영역에서 가중치를 나타낸 것이다.⁽²⁾

3. 기초형식에 따른 모델

기계기초의 효과적인 설계를 위해서는 일반 구조물의 기초 설계와는 달리 기계장비에 의해 발생하는 동적하중의 영향에 대한 검토가 필요하다. 이러한 진동기초의 형식은 지지층의 깊이, 상부하중의 규모, 지질구조, 주변 환경 등에

〈표 2〉 주파수 가중함수의 전달함수 매개 변수

가중함수	대역한계		가속도-속도 천이		
	f1(Hz)	f2(Hz)	f3(Hz)	f4(Hz)	Q4
W_d	0.4	100	2.0	2.0	0.63

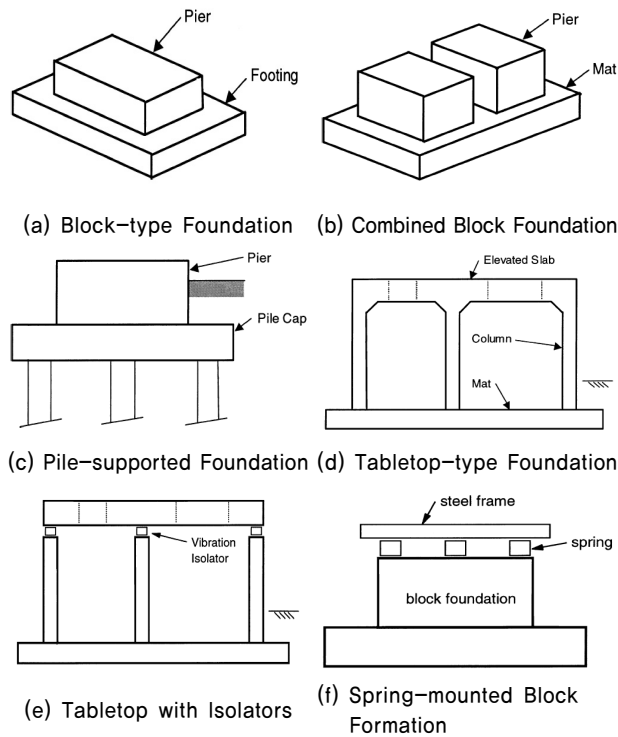


〈그림 1〉 자세경계조건에 따른 주파수 가중함수 W_d

따라 그림 2와 같이 다양한 형태를 가질 수 있다.⁽¹¹⁾

먼저, 그림 2 (a)형 기초는 기계기초의 무게중심과 동적기계가 발생시키는 하중의 위치가 최소화된 형태이다. 주로 강성 구조물로서 설계되어지는 Block-type Foundation의 동적응답은 지질의 특성, 기초의 질량 및 깊이, 동적하중에 의해 결정된다. 그림 2 (b)는 두 개 이상의 블록형 기초가 조합된 것으로, 근접한 위치에 있는 기계들을 지지할 때 사용한다. 이 형태는 큰 기초의 강성부족을 발생시킬 가능성이 있으며, 두 개 이상의 기계로부터 생기는 힘의 조합으로 인해 설계가 어려워지는 단점을 가진다. (d)는 기초 위에 높은 지지대가 있는 Tabletop-foundation Type으로써, 전력발전기와 같은 큰 터빈장치에 사용하는 것이 일반적이다. 상부 구조물은 대형장비 아래 위치하는 배관이나 파이프와 같은 부수적인 장치를 위한 곳이다. 이러한 형태는 유연성이 고려되어지기 때문에, 동적하중에 대한 이들의 반응은 복잡하며, 설치된 요소(기둥, 보, 기초)들과 이들을 지지하는 지표면의 흙의 특성에 모두 의존한다.

그림 (e)와 (f)는 일반적으로 구조물의 동적하중의 반응을 최소화 하기위해 스프링, 댐퍼 등을 지지대의 위쪽에 설치한 형태이다. 이러한 효과는 기초의 고유진동수와 기계속

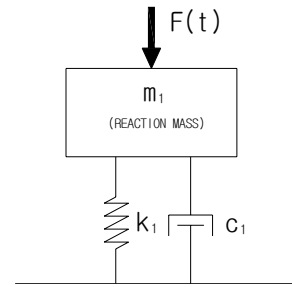


〈그림 2〉 기초 형태

도에 의해 결정된다.

그림 2 (c)는 파일에 의해 지지된 기초로서, 일반적으로 연약지반조건에서 Mat 형태의 기초가 과도한 침하와 압력에 의한 피해가 우려되는 경우에 사용하는 형태이다. 이전에 언급된 기초 형태와는 달리 지표면과 파일에 직접적으로 지지된 것으로서, 지표면 흙에 전달되는 축하중의 조합 또는 선단지력, 접착부 마찰 등에 사용되며, 파일을 가로지르는 수평하중은 파일 또는 파일캡에 있는 베어링에 의해 저항할 수 있기 때문에, 효과적인 기초 형태라 할 수 있다.

제시된 기계기초의 형태를 기반으로, 진동의 작용점이 기초의 무게중심과 일치하여 하중에 의한 기초의 회전과 모멘트에 대한 영향이 적고, 이러한 기초에 작용하는 가진력을 시간에 따른 함수로 나타내는 것이 가능하다면 그림 3과 같이 1개 또는 2개의 자유도를 가지는 Spring-damper 모델로 이상화 하여 나타낼 수 있다. 구조물을 적절히 이상화하고, 적은 자유도로 모델링하여 구조물의 응답을 계산하는 방법은 시간과 노력적인 측면에서 매우 효율적이다. 그러나 이러한 모델을 사용하여 진동기초의 사용성을 평가하기 위해서는 보다 정밀한 해석방법에 의한 가속도 응답 결과와 비교하여 적용성을 검증하는 것이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 그림 2 (c)와 같은 강관파일을 가진 콘크리트기초에 대하여 3차원 FEM해석을 수행한 결과를 단자유도로 이상화한 모델을 동일한 조건에서 가진한 결과와 비교하였다.



〈그림 3〉 Spring-Damper Model

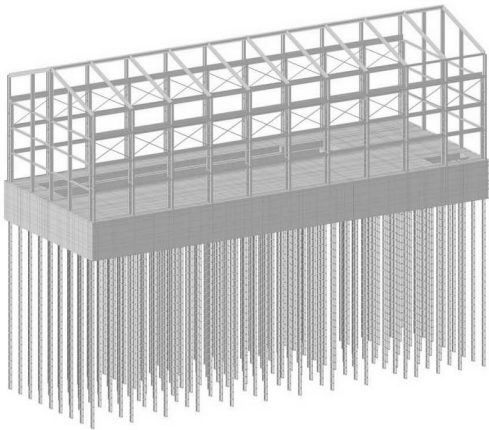
그림 3에 제시한 모델은 기초에 고정된 진동 발생원으로부터 직접하중이 전달되는 경우이며, 식 (5)와 같은 운동방정식으로 나타낼 수 있다. 여기서, M_1 , C_1 , K_1 는 각각 진동기초의 질량과 감쇠, 강성의 특성 값이며, M_2 , g 는 가진 질량과 중력가속도로 표현되는 진동의 크기, $\bar{\omega}$ 는 가진 진동수이다.

$$M_1 \ddot{u}(t) + C_1 \dot{u}(t) + K_1 u(t) = F(t) \quad (5)$$

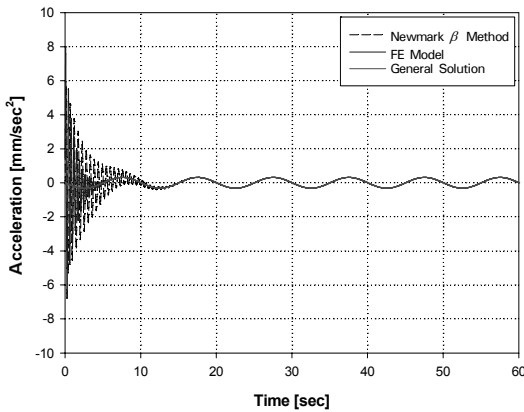
$$F(t) = M_2 \cdot g \sin(\bar{\omega} t) \quad (6)$$

적은 수의 자유도로 모델링하여 구조물의 진동 사용성을 평가함에 있어, 보다 정밀하게 적용성을 검증하기 위해 비교되어질 구조물은 KOCED 다지점 가진 대용량 지진모사 실험센터(KOCED Multi-platform Seismic Simulation Test Center, 지진실험센터)이다.

이 구조물은 최대 60톤 하중을 가지는 실험체를 $\pm 1g$ 의 가속도로 60Hz까지 동시에 가진할 수 있는 3기의 대형 진동대 장비가 설치되어 있다. 지진실험센터는 연약한 지반에 위치하고 있어 침하에 대한 안정성을 확보하기 위하여 24m 길이의 강관파일 178본이 암반에 직접지지 되도록 설계되어 있으며 최대하중 가진에 대비하여 14,340톤 중량의 콘크리트기초를 가지고 있다. 지진실험센터의 콘크리트기초 내부에는 유압발생을 위한 펌프, 유압전달을 위한 파이프라인, Strong Floor 등의 설치를 위한 공간들이 존재하여 동일한 형상으로 FE 모델을 만드는데 상당한 시간과 노력이 필요하다. 그림 4는 설계도서를 기반으로 실제 지진실험센터를 FE 모델링 한 것으로 콘크리트기초는 Solid 요소를 사용하였으며 강관파일은 Beam요소를 사용하여 모델링 하였다. 지반조사 결과에 의하여 강관파일의 수평방향 지반반력계수를 산정하여 반영하였으며, 본 구조물은 RC구조물이므로 일반적인 5%의 감쇠비를 적용하였고, 강관말뚝은 2%의 감쇠를 가정하였다. 또한 선형해석과 모드 중첩법으로 해석을



〈그림 4〉 FE Model



〈그림 5〉 시간에 따른 가속도 비교

수행하였다. 실제로 진동하중은 진동대에 연결된 다수 유압기(Hydraulic Actuator)의 조합에 의해 발생하게 되고 연결 프레임 등에 의해 콘크리트기초로 전달된다. 따라서 진동하중이 직접 구조물에 연결되어 전달된다고 가정한다면, 그림 3과 같이 1자유도로 모델링할 수 있다.

FE Model의 해석에 의해 직접하중을 콘크리트에 재하한 경우, 진동대 연결 구조를 고려한 1 자유도로 이상화한 모델의 해석결과를 그림 5에 나타내었다. 초기 가진력 도입에 의한 일시적 진동 부분에서는 이상화한 모델의 감쇠가 작게 평가되어 가속도 응답이 과대평가되는 것으로 나타났으나, Steady-state 에서는 FE 해석에 의한 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 1자유도 모델에서 가진에 의한 응답차이가 크지 않은 것은 유압기와 프레임의 강성이 크기 때문에 발생된 하중이 에너지의 소산없이 콘크리트기초에 반영되었기 때문이다.

그러므로 발생하는 진동을 규정할 수 있고, 탄성거동만을 고려한 강관과일을 가진 콘크리트 진동기초의 안정 상태에서의 해석은 Spring-Damper모델로 이상화하여 수

행해도 유효한 것으로 판단된다.

4. 1자유도 모델에 의한 진동기초의 사용성 평가

앞 절에서 논한 1자유도로 모사가 가능한 진동기초에서 ISO 2631-1 기준을 만족하는 기초와 가진 질량의 적정 질량비를 도출하고 각 진동인자의 영향을 평가해보도록 한다. 먼저 단자유도계의 강제진동 운동방정식을 나타낸 식 (5), (6)을 미분방정식의 해로 유도하면 식 (7)과 같은 가속도항을 도출 할 수 있다.

$$a(t) = -R \frac{w^2 g M_1}{((K_1 - M_1 w^2)^2 + (C_1 w)^2)} \cdot ((K_1 - M_1 w^2)(\cos wt) + (C_1 w)(\sin wt)) \quad (7)$$

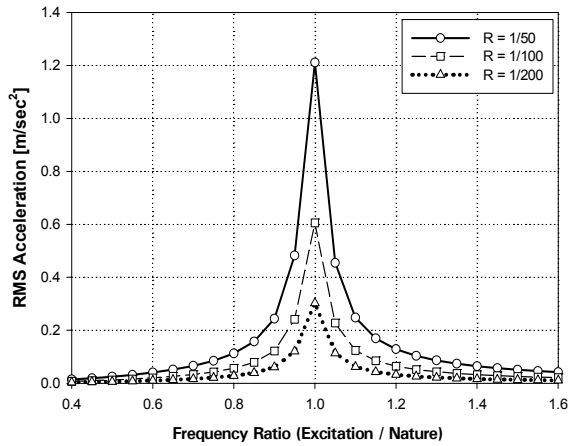
여기서 R 은 가진 질량에 대한 기초질량의 비(M_2/M_1)이고, g, ω 는 각각 중력가속도, 가진 각진동수를 나타낸다. 위 식 (7)로부터 진동기초의 가속도 응답은 가진 진동수, 질량비, 중력가속도에 비례하는 것을 예상할 수 있다.

본 연구에서는 자세경계조건에 따른 주파수 가중함수의 필터특성을 적용하기 위해 시간영역의 가속도항을 주파수 영역(Frequency Domain)으로 푸리에 변환하고 필터를 적용한 후, 다시 시간영역으로 역푸리에 변환하여 얻은 가속도 응답의 RMS 값을 사용하였다. 이는 가진력을 일정한 진폭을 가지는 Sine 함수로 규정하였으므로 식 (8)과 같이 RMS 값에 의해 평가할 수 있다.

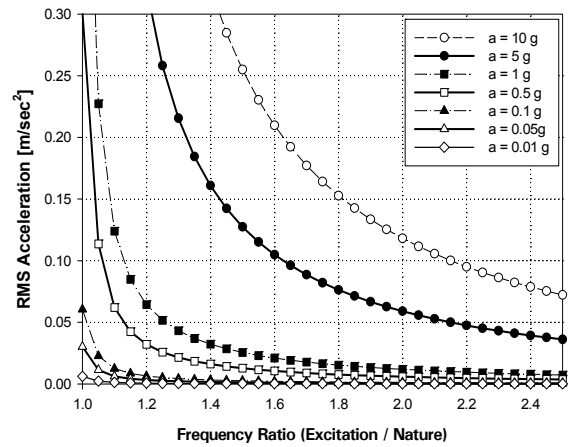
$$a_s = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (8)$$

위 식을 통해 구할 수 있는 RMS 가속도 값으로 각 변수별 영향을 검토하기 위해 진동수비, 질량비, 가진력에 작용하는 중력가속도를 달리하여 그 결과를 분석하였다. 이는 FE Model과 그 적용성을 검증한 단자유도 모델의 Newmark β 방법을 사용하여 얻은 동적응답결과이다.

그림 6은 진동수비(가진 진동수/고유진동수)에 따른 RMS (m/sec²)가 적용된 가속도 변화를 부분적으로 확대하여 나타낸 것이다. 본 그림에서는 진동수비가 1인 지점을 기준으로 RMS 가속도가 상대적으로 증폭하지만, 다시 점차적으로 그 가속도가 작아지는 경향을 보인다. 이는 FE Model로 이상화한 다지점 가진 실험센터 기초의 고유진동수인 2.73Hz와 가진 진동수가 일치하는 경우 공진에 의한 진동



〈그림 6〉 진동수비에 따른 RMS 변화



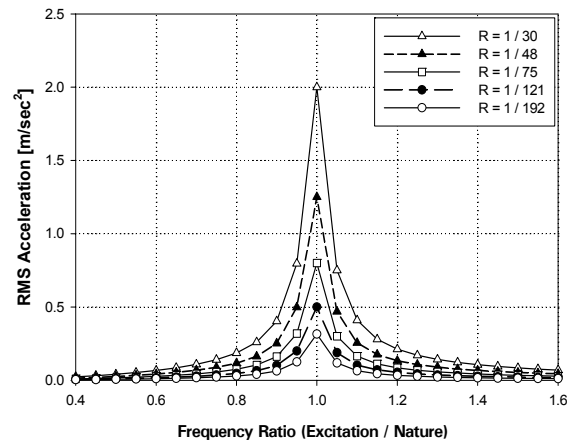
〈그림 7〉 중력가속도에 따른 RMS 변화

으로 RMS 가속도 값이 증폭되어 나타나는 것이라 할 수 있다. 그림에서 제시된 질량비는 임의로 선정하였으며, 질량비가 증가할수록 RMS 가속도가 선형적으로 증가하는 것으로 보아, 예상되는 질량비로 RMS 가속도가 대략적으로 유추 가능함을 알 수 있다.

그림 7은 구조물에 작용하는 가진력(가속도)과 RMS 가속도와의 관계를 표현한 것이다. 가진되는 가속도는 0.01g 부터 10g까지를 대상으로 하였으며, 질량비는 0.01로 일정하게 유지하였다. 가속도가 증가할수록 진동수비가 1인 지점을 기준으로 RMS 가속도 값이 증가하는 것으로 보아, 가진력에 작용하는 가속도 또한 가중화된 RMS 가속도와 서로 비례함을 알 수 있다. 지금까지의 결과로부터 기계진동 기초의 진동안정성은 식 (8)에서와 같이 질량비, 진동수비, 가진력에 작용하는 가속도의 영향이 중요한 고려사항임을 알 수 있다.

그림 8은 ISO 2631 기준에서 제시한 진동인지평가한계에 따라 0.315 ~ 2.0 (m/sec²)의 RMS 가속도 응답을 최대로 갖는 질량비의 변화를 나타낸 것이다. ISO 2631 기준에서 제시한 사용성 한계는 RMS 가속도 응답을 0.315m/sec² 이상일 경우 약간의 불편한 정도를 인지한계로 정의하며, RMS 가속도 응답이 0.8 m/sec² 일 경우를 사용성 한계로 정의하고 있다. 따라서 진동에 의해 발생할 수 있는 최대 RMS 가속도 값이 0.8m/sec² 를 초과하지 않는 범위 내에서 진동기초가 설계되어야 한다.

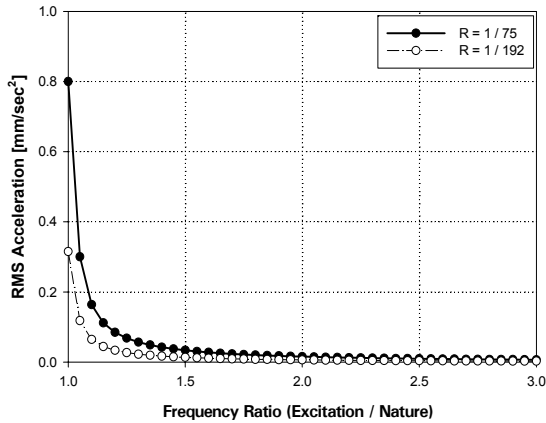
본 논문에서 진동 사용성 평가를 위해 FE Model에 사용한 실제 구조물의 기초 질량 m_1 은 14,340ton 이고, 실제 설계된 진동대의 최대실험하중 191 ton을 M_2 에 반영하였다. 따라서 적용대상 구조물의 실제 최대 질량비는 0.013(1/74)으로, 그림 8을 통해 0.81 m/sec²의 최대 RMS 가속도를 가지는 것을 확인할 수 있다. 이는 해외기준에서 제시한 인체



〈그림 8〉 인지한계값을 최대로 갖는 RMS 변화

가 불안함을 느끼기 시작하는 인지한계와 사용성 한계의 범위에 모두 만족하지 않는 것으로 나타났으나, 결정된 RMS 가속도는 구조물의 공진점에서 발생한 것이며, 공진에 의한 영향을 완전히 배제하기는 불가능하므로 기초의 고유진동수와 동일한 가진 진동수로 최대하중을 적재하여 일정시간 이상 정현파형을 구현하지 않는 것으로 장비사용을 제한하고 대상 구조물의 사용목적상 지진파형 및 일정 주파수 대역의 랜덤파형을 가진하는 경우가 대부분이므로 최대하중에서의 실험실 사용은 만족하며, 진동에 안전한 적정질량비를 가지고 있는 것으로 판단할 수 있다.

그림 9는 기준에서 제시한 사용성 한계와 인지한계 RMS 가속도를 최대로 갖는 질량비 변화를 가진진동수가 고유진동수보다 큰 경우($f \geq 1$)에 대하여 나타낸 것이다. 본 연구 결과를 통해 설계 시 자중을 고려한 진동대와 콘크리트 기초의 최적의 질량비는 0.013(1/75)이하여야 함을 확인할 수 있었고, 편안함을 인지하는 0.315 m/sec² 의 RMS 가속도 이내에서 만족하는 최적의 질량비는 0.00512(1/195)이내의



〈그림 9〉 인지 및 사용성 한계값을 최대로 갖는 RMS 변화

값을 가져야 함을 알 수 있었다.

일반적인 진동기초의 안정성은 발생하는 진동에 대하여 그 구조물의 사용기간 동안 보장되어야 하고, 접촉된 신체에 대하여 반영구적으로 편안함을 줄 수 있어야 한다. 또한 진동기초 안정성의 중요한 인자로 질량비와 진동수비임을 알 수 있었으며, 위 결과를 통해 질량비로 RMS 가속도를 대략적으로 유추할 수 있었다. 질량비의 경우 가중화된 가속도와 비례관계이므로 간단히 규정할 수 있으며, 구조물의 고유진동수 보다 가진 진동수가 큰 경우에는 RMS 가속도가 다시 낮아지는 경향을 보이므로 질량비가 1인 경우의 가중화된 가속도 결과를 기준으로 비례관계인 질량비를 규정할 수 있다. 이러한 관계는 비선형회귀에 의해 식 (9)와 같이 나타낼 수 있으며 진동 사용성 기준으로부터 가진원의 적정질량한계를 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$a_{rms} = R \cdot 0.1145 \exp\left(\frac{4.2375}{f_r - 0.1405}\right) \quad (9)$$

$$m_2 \leq C \cdot m_1 / \left(0.1145 \exp\left(\frac{4.2375}{f_r - 0.1405}\right)\right) \quad (10)$$

여기서 R 은 기초와 가진 질량의 비, C 는 ISO 2631 기준에서 규정하고 있는 적용 진동인지한계, f_r 은 고유진동수와 가진 진동수의 비이다. 제안된 식에 의해 지진실험센터에서의 질량비 적정성을 확인하였다. 진동대의 최저 가동 진동수는 0.1Hz이나 제안된 식은 기초의 고유진동수 이상에서 만족하므로, 기초의 고유진동수인 2.73Hz보다 큰 2.8Hz로 가진하는 경우를 대상으로 확인하였다. 그 결과, 기초의 질량 $m_1 = 14340$ ton을 적용하였을 때, 편안함의 기준에 의한 식 (10)의 가진 질량의 최대값으로 835 ton을 구할 수 있었다. 이는 실제 설계된 진동대의 최대실험하중 191 ton에 대하여 크게 만족하는 결과이다.

5. 결론

본 논문에서는 진동기초질량과 가진 질량과의 적정여부를 확인하기 위하여 ISO 2631-1에 의한 진동 사용성 평가 기준에 대하여 고찰하고, 기초 형식에 따른 1개의 자유도를 가지는 이상화된 모델을 정밀한 유한요소모델에 의한 해석 결과와 비교하여 그 적용성을 평가한 후 이에 따른 가중화된 RMS 가속도 값을 인지평가한계와 비교 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 파일기초에 발생하는 진동을 시간에 따른 Sine 함수로 가정하고, 탄성거동만을 고려한 강관파일을 가진 콘크리트 진동기초의 안정상태에서 해석은 복잡한 FE Model에 의한 결과와 1개의 자유도를 가진 단순한 Spring-damper 모델에 의한 해석결과의 비교결과 큰 차이를 발견할 수 없었다.
2. 기초에 직접 진동하중이 전달되는 경우 Spring-damper 모델의 가중화된 가속도 값에 의한 진동 사용성 분석결과 질량비가 증가할수록 가중화된 가속도가 증가하는 것으로 나타났으며 기초구조의 진동수와 가진 진동수가 일치하는 경우 공진에 의해 가중화된 가속도 또한 증폭되는 것으로 나타났다.
3. 기초구조의 고유진동수 이상의 진동이 발생하는 경우에 ISO 2631-1 기준에서 제시하고 있는 평가한계를 적용한 적정 가진 질량에 대한 제안식을 제시하였으며, 제안식에 의한 KOCED 다지점 가진 대용량 지진모사 실험센터의 기초의 질량은 가진 질량에 대하여 충분한 안정성을 확보하고 있는 것으로 판단된다. 그러나 향후 실제 구조물을 대상으로 가속도 계측응답에 의한 평가를 실시하여 제안식을 확인하는 것이 필요하다.
4. 본 논문은 실제실험위주가 아닌 FE Model 자료를 근거로 연구하였으며, 이 결과만으로 대표성을 갖기는 어렵다. 따라서 구조물의 거주자를 위한 거주성능을 확보하기 위한 연구를 위해 실제실험을 통하여 보다 다양한 접근방법과 실제 인체진동 평가자를 대상으로 진동체감에 영향을 주는 요인(자세, 성별 등)을 고려한 정량적인 연구가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년) BK21 유비쿼터스 향만물류 인프라 구축사업단의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 최형석, 김남식, 정진환, “진동대 실험시설 기초의 진동영향 평가,” 한국지진공학회 2008년 춘계학술발표회 논문집, 878호, 245-252, 2008.
2. ISO, “ISO 2631 Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration,” 1997.
3. 전법규, 김남식, 김성일, “진동사용성을 고려한 철도교량구조물의 강성한계 분석,” 한국철도학회논문집, 제11권, 제5호, 489-498, 2008.
4. 신은영, 김진원, 김호영, 조원근, 하영철, “기계진동을 받는 건축물의 사용성 평가,” 대한건축학회지회연합회 학술발표대회 논문집, 제1권, 841-864, 2008.
5. 이성수, 전호민, 이중원, 홍갑표, “바닥진동 평가방법에 사용된 평가척도의 비교분석,” 대한건축학회논문집 구조계, 제22권, 제3호, 3-10, 2006.
6. 이민정, 한상환, “철도 진동의 영향을 받는 주거 건물의 진동 평가 기준의 비교분석,” 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 제29권, 제1호, 33-36, 2009.
7. 이성수, 홍갑표, “수직진동 평가기준의 적용 현황과 국내의 진동기준에 대한 평가인식,” 대한건축학회논문집 구조계, 제19권, 제2호, 49-56, 2003.
8. Asik, M.Z., and Vallabhan, C.V.G., “A simplified model for the analysis of machine foundations on a nonsaturated, elastic and linear soil layer,” *Computers and Structures* 79, 2717-2726, 2001.
9. Chen, S. S., and Shi, J. Y., “Simplified model for torsional foundation vibrations,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 27, 250-258, 2007.
10. Rao, R. V., and N.S.V., “Dynamic analysis of pile foundation in time domain using lanczos vectors,” *Computers and Geotechnics* 24, 297-322, 1999.
11. ACI Committee 351, “Foundations for Dynamics Equipment,” 2004.
12. Jung, D.J., Kim, J. W., Choi, H.S., and Cheung, J.H., “An Evaluation of Vibration Comfort on Reaction Mass Foundation with Shake Table System,” *7CUEE & 5ICEE joint conference proceedings*, 2010.
13. 전법규, 김남식, “교량구조물의 진동 사용성 분석,” 한국소음진동공학회 논문집, 제17권, 제10호, 923-935, 2007.
14. 정진환, 김남식, 김인태, 박찬영, 최형석, “KOCED 지진실험센터,” 대한토목학회 학술발표회 논문집, 제57권, 제8호, 43-49, 2009.
15. MTS System Corporation, “Technical Proposal for High Performance Seismic Simulation Test System,” 2006.
16. British Standard Institution, *BS 6841 British Standard Guide to Measurement and Evaluation of Human Exposure to Whole-body Mechanical Vibration and Repeated Shock.*, 1987.