

사무실 건물에서의 펌프진동에 따른 방진장치의 제어효과

Control Effect of Isolator on the Pump Induced Vibration in Office Building

노병철*

Lho, Byeong Cheol

국문요약

펌프는 다른 진동 유발원들과는 달리 일정한 주파수 및 크기를 갖는 진동을 일으키므로 스프링이나 댐퍼와 같은 간단한 방진기구를 이용하여 진동을 제어할 수 있다. 현재 국내에서는 대부분의 펌프에 이러한 방진장치를 설치하는 것이 일반화되어 있다. 그러나 펌프의 용량 및 중량, 주변 구조물의 형태 및 크기 등에 따라서 방진기구의 채택이 불필요한 경우도 있으므로 설비 진동기초에 대한 확실적인 설계와 시공개념은 불필요한 인적, 시간적 및 경제적인 낭비를 초래할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 사무용 건물에 사용되는 각종 펌프류에 대하여 가진특성과 구조물의 진동가속도응답을 측정하는 진동실험 및 이론적 해석을 실시하고, 본래 계와 수정된 계의 진동응답과 허용진동수준을 비교·분석함으로써, 방진장치의 설치가 불필요한 펌프용량을 제시하였다.

주요어 : 방진장치, 펌프진동, 진동가속도응답, 허용진동수준

ABSTRACT

Pump induced vibration can be controlled by simple vibration proof equipments such as spring and/or damper, because it induces vibrations with constant frequency and amplitude unlikely other vibration sources. Recently such an isolator is generally installed in Korea. But the isolator can be uninstalled according to the capacity and weight of pump, and the shape and the size of structures, and such a uniform concept of design and construction leads to results of the waste of manpower, time and money. In this study, several vibration measurements are conducted to investigate the characteristics of pump induced vibration force in building, and the acceleration responses of structures are measured by experimental method and estimated by theoretical method. And through the comparisons of the accelerations between original and modified system, the capacity of pump is suggested which uses no isolator in case of these structures

Key words : isolator, pump induced vibration, acceleration response, allowable vibration criteria

1. 서 론

건물에 사용되고 있는 펌프류는 다른 진동 유발원들과는 달리 일정한 주파수 및 크기를 갖는 진동을 일으키므로 스프링이나 댐퍼와 같은 간단한 방진기구를 이용하여 비교적 용이한 방법에 의하여 진동을 제어할 수 있다. 한편, 펌프진동의 경우 펌프에 연결된 파이프 등과의

원활한 연결 및 파손 방지와 펌프진동으로 인한 주변 구조물로의 진동전달을 방지하기 위한 방진개념을 고려하여야 한다. 또한 일반 사무실용 진동기구의 경우 운영시 외부 진동에 대하여 민감하지 않으므로 방진개념에서 접근하는 것이 바람직하며, 진동제어방법은 설치비가 저렴하고 유지관리가 쉬운 수동적 진동제어 방법이 주로 사용된다.⁽¹⁾ 수동적 진동제어의 기본개념은 계의 고유주파수와 가진주파수를 달리함으로써 공진을 회피하고 동적증폭률을 낮추는 것이다. 고유주파수와 가진주파수를 달리하기

* 정회원 · 상지대학교 토목공학과 조교수

본 논문에 대한 토의를 2000년 6월 30일까지 학회로 보내 주시기
그 결과를 게재하겠습니다.

위한 고유주파수의 조정은 대상구조물의 조건에 따라 가진주파수에 비하여 고유주파수를 극히 낮게(low tuning) 하거나 높게(high tuning) 한다.⁽²⁾ 즉, 건설구조물의 경우 계의 안정성을 고려하여 계의 고유주파수가 높아지도록 설계를 하며, 펌프류 및 진동을 유발하는 장비류의 탑재대의 경우에는 계의 고유주파수가 가능하면 낮아지도록 설계를 하게 된다. 전자의 경우에는 구조물의 강성을 높히고, 진동감쇠가 큰 재료를 사용하는 것이 일반적이며, 후자의 경우 스프링, 댐퍼 또는 이를 혼합한 진동제어기구를 사용하며, 계의 안정성 확보를 위하여 스프링상수 및 질량을 증가시키며⁽³⁾⁻⁽⁵⁾ 이를 위하여 콘크리트 슬래브 등을 삽입하게 된다. 만약 이러한 방진기구의 설치가 불필요하다는 근거를 확보할 수 있다면, 설계로부터 시공에 이르는 과정을 생략할 수 있으므로, 합리적이며 경제적인 시공을 할 수 있다. 그러므로 건물에 사용되는 각종 펌프류에 대하여 가진특성과 구조물의 응답을 측정하는 진동실험을 실시하여야 하고, 진동실험 결과로부터 펌프의 용량에 따른 가진력과 진동수준을 산정하여 계의 진동응답과 허용진동수준을 비교·분석함으로써 불필요한 진동제어기구의 설치를 배제하기 위한 기준을 제시할 필요가 있다.

2. 측정범위 및 진동허용기준

펌프방진시 불필요한 진동제어 기구의 설치를 배제하기 위한 기준을 제시하기 위해서 현재 사무실 건물 내에서 일반적으로 사용되고 있는 펌프를 대상으로 펌프 용량 및 규모에 대한 조사를 실시하였으며, 펌프 용량에 따른 진동의 특성을 파악하기 위하여 진동가진력의 크기를 실험 및 이론적인 방법으로 도출하여 펌프진동에 의한 구조물의 진동예측기법을 정립하였다.⁽⁶⁾ 또한, 이론적 해석과 진동실험을 비교하여 해석 모델에 대한 타당성을 검증한 후 진동제어 요소를 제거한 후의 진동가속도값을 예측하고, 이를

허용 진동가속도 수준과 비교함으로써, 진동제어 요소의 삽입이 불필요한 펌프의 용량을 결정하여야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 진동계측지점을 Fig. 1에 나타난 바와 같이 바닥슬래브, 콘크리트 기초, 방진가대의 세 지점으로 선정하고, 각 위치에 1축 및 3축 가속도 센서를 설치하였으며, 이로부터 펌프중량에 따른 진동계의 응답(펌프 가진력의 산정 및 진동실험)을 계측하였다.

한편, 본 연구에서 적용한 진동기준은 인체에 대한 진동기준인 ISO 2631/1⁽⁷⁾과 건물에 대한 진동기준인 ISO 1631/2⁽⁷⁾와 국내의 허용진동기준⁽⁸⁾을 참고로 하였다. 이전부터 사용되는 가속도의 크기와 폭로시간의 관계는 수직방향 및 수평방향에 대하여 Fig. 2 및 Fig. 3과 같다. 이 규정은 진동수가 1Hz~80Hz인 범위에서 주기적 또는 일시적인 진동이 인체에 미치는 영향을 세 분야로 구분하였으며, 식사나 독서 같은 활동시 견딜 수 있는 소란(불안)에 대한 한계를 <안락-감퇴경계>, 현저한 능률저하와 함께 피로를 유발하는 반복적인 진동에 대한 한계를 <피로-능률감퇴 경계>, 인체의 건강과 안전에 대한 최대진동을 나타내며 <안락 감퇴경계>의 6배 정도인 <노출한계>로 나누고 있다.

한편, 건물내의 진동이 사람에게 미치는 영향 평가에 관한 규격으로서, ISO에서 제시한 건물에 대한 피해시점의 상한으로 6mm/s(충격에는 5~30mm/s)를 제시하였으며 그 내용은 Table 1과 같다.⁽⁸⁾ 여기서 진동기준값은 가속도 (mm/s^2)이고, 이를 dB로 환산하여 나타내었다.

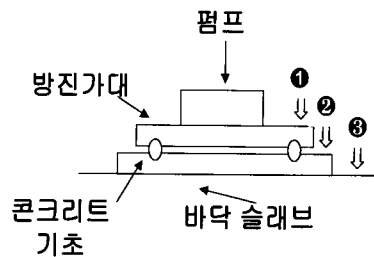


Fig. 1 Schematic view of measuring points

국내의 경우 환경 진동기준은 소음·진동 규제법 시행규칙 중 개정령에서는 dB(V) 단위를 사용하고 있으며, 공해진동과 관련하여 도로나 철도에서 발생하는 교통진동의 기준 및 건설·생활진동을 Table 2와 같이 제시하고 있다.⁽⁶⁾

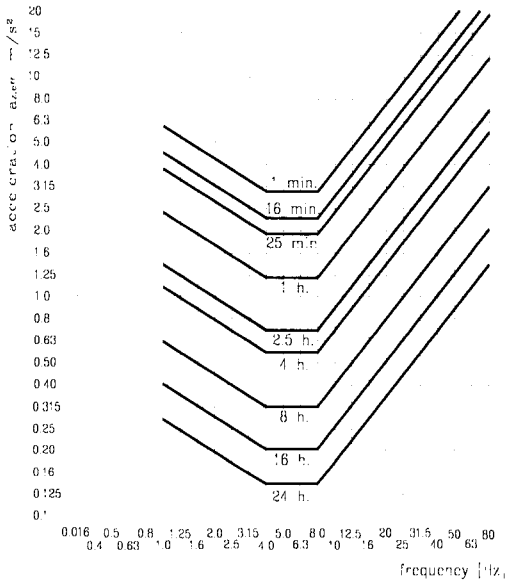


Fig. 2 Bounds on z-acceleration for <fatigue-decreased proficiency>⁽⁷⁾

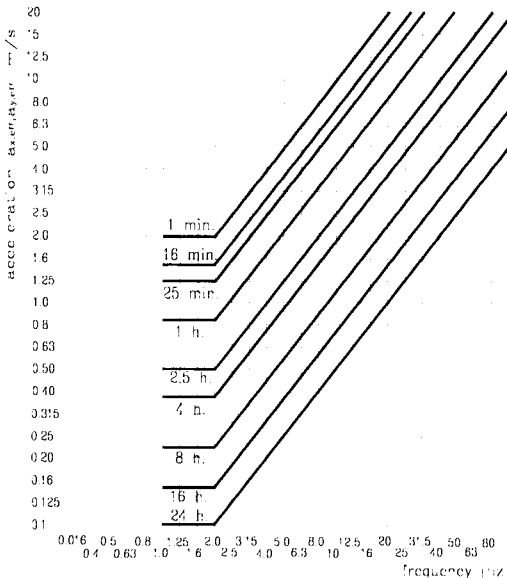


Fig. 3 Bounds on x- and y-acceleration for <fatigue-decreased proficiency>⁽⁷⁾

Table 1 Allowable vibration criteria(ISO, for 8 hr)

지역	시간	연속진동 (dB(V))	충격진동 (dB(V))
병원의 수술실등 정숙을 요하는 지역	-	51	54
주거지	낮	57	60
	밤	54	
사무실	-	63	66
공장, 작업장	-	69	72

Table 2 Allowable vibration criteria (Korea)

대상지역	시간	
	주간 (06:00~22:00)	야간 (22:00~06:00)
주거지역, 녹지지역, 준도시지역중 취락지구 및 운동·휴양지구, 자연환경보전지역, 학교·병원·공공도서관이 부지경계선으로부터 50m 이내지역	65	60
상업지역, 공업지역, 농림지역, 준농림지역 및 준도시지역중 취락지구 및 운동·휴양지구 외의 지역, 미고시지역	70	65

즉, 국내에서 적용되고 있는 사람과 관련된 진동수준(VL)은 조건에 따라 60dB(V)~70dB(V) 정도이며, 이와 같은 진동수준은 진동에 대하여 사람이 약간 느끼거나 크게 느낄 수 있는 정도의 진동가속도량의 응용결과임을 알 수 있으며, 이는 3Hz~200Hz 영역에서 대략 10gal 이하 정도임을 알 수 있다.

3. 펌프가진력 산정

한편, 대상펌프에 대한 가진력의 산정은 이론적 방법과 실험적 방법에 의한 가진력의 산정으로 구분할수 있으며, 본 연구에서는 주파수 및 시간영역에서의 가진력의 성분을 Fig. 4 및 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 실험적으로 구하여 수치해석을 위한 입력자료로 활용하였다.⁽⁶⁾ 즉, 주파수영역에서의 가진력은 29.5Hz일 때 120kgf,

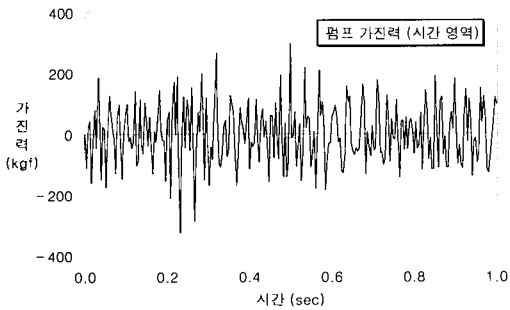


Fig. 4 Pump induced vibration force(time domain, 50Hp)

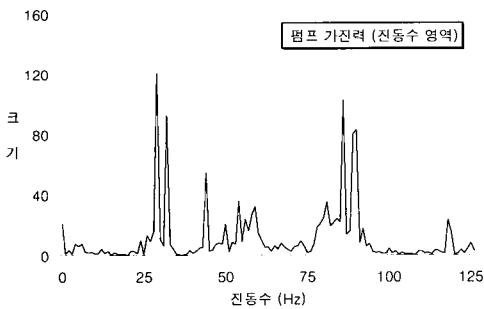


Fig. 5 Pump induced vibration force(freq. domain, 50Hp)

59.0Hz일 때 32kgf, 89.0Hz일 때 102kgf 가 작용하는 것으로 하였다.

4. 구조물 진동 계측 및 해석

진동측정은 A건물(150Hp), B건물(100Hp), C 건물(75Hp), D건물(50Hp), E건물(50Hp), EE건물(50Hp), F건물(25Hp), G건물(20Hp), H건물(20Hp) 및 HH건물(20Hp)을 대상으로 하여, 펌프 방진가대와 콘크리트 기초 및 바닥 슬래브에서 실시하였으며, 특별히 E 및 H 건물은 기존의 스프링에 의한 방진장치를 고정시킨 후 방진장치의 유무에 따른 비교를 위하여 진동실험 및 이론적해석을 실시하였다. 한편, 암진동(background vibration)의 영향을 극소화하기 위하여 암진동이 최소가 되는 시간대에 펌프 가동후의 각 위치에서의 진동수준을 측정하여 비교하였다. 진동측정은 0Hz~200Hz의 주파수 범위에서 가속도 값을 측정하였으며, 전원에 의한 잡음과 같은 가진력 이외의 영향요소의 배제를 함으로서 정확한 측정을 하였다.

4.1 시간 영역에서의 진동 가속도응답 실험

시간 영역에서 진동가속도 값의 의미는 관성 주파수영역(0Hz~200Hz)에서의 가진력에 의한 각 구조물상에서의 가속도응답을 나타낸 것이다. Table 3은 각 위치에서 시간 영역에서의 진동가속도값을 정리한 것으로 펌프의 용량이 작을수록, 펌프에서부터 떨어진 정도에 따라 진동가속도가 작아짐을 알 수 있다. 즉, 연구대상인 펌프에 대한 실험결과만을 종합한 분석으로는 방진가대에서부터 콘크리트 기초사이에는 26dB~58dB정도의 진동가속도 감소가 있으며, 방진가대에서 바닥 슬래브간에는 24dB~62dB정도의

Table 3 Maximum value in time domain (gal/dB)

내용 건물	마력 (Hp)	방진대	콘크리 트 기초	바닥 슬래브	한층위 슬래브	방진방법
A	150	125	-	9.1	2.0	방진가대 방진패드4개 콘크리트 기초
		102	-	79	66	
B	100	773	6.7	20.6	4.3	방진가대 앵커설치 콘크리트 기초
		118	77	86	73	
C	75	208	10.1	10.2	3.6	방진가대 방진패드4개 콘크리트 기초
		106	80	80	71	
D	50	20	0.4	1.3	-	방진가대 고무패드6개 콘크리트 기초
		86	52	62	-	
E	50	515	6.9	5.6	-	방진가대 앵커설치 콘크리트 기초
		114	77	75	-	
EE	50	462	7.4	5.4	-	방진가대 방진스프링6개 콘크리트 기초
		113	77	75	-	
F	25	-	-	1.4	-	방진가대 앵커설치 콘크리트 기초
		-	-	63	-	
G	20	328	4.2	4.9	-	방진가대 방진패드4개 콘크리트 기초
		110	73	74	-	
H	20	150	1.1	0.5	-	방진가대 앵커 설치 콘크리트 기초
		104	61	53	-	
HH	20	124	0.2	0.1	-	방진가대 방진스프링6개 콘크리트 기초
		102	44	40	-	

진동가속도 감소가 있음을 알 수 있다. 일반적으로 펌프용량이 작아질수록 방진가대 위에서의 진동가속도가 작아짐을 알 수 있으며, 콘크리트 기초 및 콘크리트 바닥 슬래브의 진동수준도 작아짐을 알 수 있다.

한편, 방진스프링을 사용한 경우의 진동가속도는 방진가대에서 콘크리트 기초간에는 124gal~455gal 또는 36dB~58dB정도의 진동감소가 있으며, 방진가대에서 바닥 슬래브사이에는 124gal~457gal 또는 38dB~62dB정도의 진동감소가 있음을 알 수 있다.

4.2 주파수 영역에서의 진동가속도 응답 실험

건물내 기계실의 각 위치에서 주파수 영역에서의 진동성분을 검토함으로써 펌프 진동에 의한 구조물의 응답이 주로 어떤 주파수에서 지배적으로 발생하고 있는가를 분석하였다. Table 4는 펌프가동시의 방진가대 위, 콘크리트 기초 및 바닥 슬래브에서의 각 펌프에 의한 주요 주파수 영역에서의 진동가속도응답을 정리한 것으로, 진동가속도응답은 방진가대 위에서 가장 크게 측정되었으며, 콘크리트 기초를 거치면서 현저한 진동저감 현상이 있음을 알 수 있었다. 펌프진동은 주요 주파수(30Hz 주변 주파수) 이외에도 극수(2극~4극) 및 펌프상태에 관계된 가진주파수 성분이 유발되고 있음을 알 수 있으며, 펌프용량에 따라 가진 에너지가 증가하며, 펌프의 회전수를 가진주파수로 정상적(steady state)으로 작용됨을 알 수 있다. Table 4에서 앵커로 시공한 경우의 펌프용량에 따른 각 위치에서의 진동수 성분은 방진가대를 거치면서 11.2gal~99.7gal 수준이던 진동가속도가 바닥 슬래브에서는 0.03gal~0.7gal 수준으로 저감되며, 패드 시공한 경우에는 방진가대를 거치면서 2.3gal~18.3gal 수준이던 진동가속도가 바닥 슬래브에서는 0.2gal~5.3gal 수준으로 저감됨을 나타내고 있다. 또한 스프링 시공한 경우 방진가대를 거치면서 7.8gal~76.2gal 수준이던 진동가속도가 바닥 슬래브에서는 0.00gal~2.0gal 수준으로

Table 4 Acceleration around 30Hz (gal/dB)

내용 건물	마력 (Hp)	방진가대	콘크리트 기초	바닥 슬래브	한층위 슬래브
A	150	10.3 80	- -	0.3 50	0.5 54
B	100	13.3 82	0.3 48	0.7 57	0.02 27
C	75	18.3 85	2.4 68	5.3 74	0.01 20
D	50	2.3 67	0.2 48	0.2 45	- -
E	50	99.7 100	0.7 57	0.2 45	- -
EE	50	76.2 98	1.9 66	2.0 66	- -
F	25	- -	- -	0.1 42	- -
G	20	12.5 82	0.2 47	0.3 49	- -
H	20	11.2 81	0.1 39	0.03 31	- -
HH	20	7.8 78	0.09 19	0.00 0.0	- -

저감됨을 나타내고 있음을 알 수 있다.

한편, Table 5는 펌프가동시 방진가대에서 콘크리트 바닥 슬래브로 진동이 전달될 때의 진동가속도 및 30Hz부근의 탁월주파수 영역에서의 감소율을 정리한 것으로, 스프링을 이용한 진동감소 효과는 시간영역에서 98.8%~99.9% (38dB~62dB)정도이며, 주파수 영역에서는 97.4%~100% (32dB~78dB)정도임을 알 수 있다. 또한 패드를 이용한 진동감소 효과는 시간영역에서 92.7%~98.5% (23dB~36dB)정도이며, 주파수 영역에서는 71.0%~97.6% (11dB~33dB) 정도임을 알 수 있다. 한편, 앵커를 이용한 진동감소 효과는 시간영역에서 97.3%~99.7% (32dB~78dB)정도이며, 주파수 영역에서는 94.7%~99.8% (25dB~55dB)정도임을 알 수 있다.

위의 결과 분석으로부터 시간 및 주파수영역에서의 진동감소 정도는 패드-앵커-스프링 순서로 증가함을 알 수 있으며, 일반적으로 패드에

Table 5 Decrement rate of vib. in time & freq. domain

구분	가속도 gal/dB		30Hz부근의 탁월주파수		감소율 (%)/dB	
	방진 가대	바닥 슬래브	방진 가대	바닥 슬래브	시간 영역	진동수 영역
A	125 102	9.1 79	10.3 80	0.3 50	92.7 23	97.1 30
B	773 118	20.6 86	13.3 82	0.7 57	97.3 32	94.7 25
C	208 106	10.2 80	18.3 85	5.3 74	95.1 26	71.0 11
D	20 86	1.3 62	2.3 67	0.2 45	93.5 24	91.3 22
E	515 114	5.6 75	99.7 100	0.2 45	98.9 39	99.8 55
EE	462 113	5.4 75	76.2 98	2.0 66	98.8 38	97.4 32
F	- -	1.4 63	- -	0.1 42	- -	- -
G	328 110	4.9 74	12.5 82	0.3 49	98.5 36	97.6 33
H	150 131	0.5 53	11.2 81	0.03 31	99.7 78	99.7 50
HH	124 102	0.1 40	7.8 78	0.00 0	99.9 62	100 78

의한 방진장치의 효율성은 크지 않음을 알 수 있다.

4.3 수치해석에 의한 구조진동해석

일반적으로 진동량에 대한 실측과 해석에 의한 결과 값은 정확하게 일치하는 경우가 드물다. 이는 해석적으로 현장의 모든 제반 조건을 정확하게 재현할 수 없으며, 또한 가장 중요한 요소의 하나인 가진력을 정확히 산정하여 입력하기가 곤란하기 때문이다. 따라서 진동해석은 많은 타 연구에서와 같이 측정값과 비교하여 일관적인 경향성 및 일정한 차이를 갖는 정량성을 내포하게 되면 만족한 결과의 도출로 판단할 수 있다.

이론적 해석은 2자유도계 모델에 대한 해와 일반 상용 해석 프로그램인 SAP90을 이용하였으며, 산정된 펌프 가진력의 신뢰성확인 및 방진재의 특성해석을 실시하였다. 수치해석 모델은 바닥 슬래브와 결합되어 있는 지반의 지반 스프링화, 바닥 슬래브 및 콘크리트 기초의 shell

요소화, 현장 방진재인 스프링의 탄성 모델화, 공학적인 수치 및 가진력 산정 연구 결과에 따른 가진력 변화를 변수로 하였다.

E 및 EE 건물내 펌프 하부의 구조는 지반상에 바닥 슬래브가 있고, 그 위에 콘크리트 기초, 방진 스프링 및 방진가대, 그리고 펌프로 구성되어 있다. 실측은 현재 시공되어 있는 상태인 스프링 설치시와 앵커볼트를 이용하여 방진가대를 고정시킨 후의 진동량을 측정하였고, 해석은 스프링 모델과 고정식 모델을 구성하고 해석을 수행하여, 이들 각각의 진동량 변화를 서로 비교하였다.

모델링은 펌프를 중심으로 일정 구간에 해당되는 구조평면으로 한정하였고, 경계조건은 Fig. 6에 나타난 바와 같이 외벽 측면(2개면)을 제외하고, 한정된 평면상의 수평축(x축 및 y축)으로 변위의 발생을 제한하였다. 이는 외부로 연속된 인접 구조 슬래브의 평면방향 지지역할을 크게 기대할 수 있기 때문이다. 그러나 각 방향 회전 에 대하여는 자유롭게 회전할 수 있는 상태로 하여 진동흐름을 실제 현상과 같도록 유도하였다.

다음으로 바닥 슬래브 하부의 지반은 다른 구조와 달리 진동에 직접적인 영향을 주고 있으며, 또한 정밀해석을 위한 진동흐름의 판정을 위해서는 지반 스프링의 역할이 매우 중요하다. 한편, 수평 및 rocking motion에 관한 스프링 모델과 원형 기초에서 발생하는 비틀림 운동은 고려하지 않았다. 본 모델과 관련된 전반적인 지반 스프링값의 산정 방법은 다음의 Table 6, Table 7 및 Fig. 7에서 제시한 것과 같다.

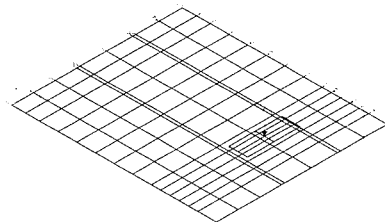


Fig. 6 Analysis model of building

Table 6 Equivalent soil spring coefficient⁽¹⁰⁾

Mode of Vibration	Circular Footing	Rectangular Footing
Vertical	$k_z = \frac{4Gr_0}{1-\nu} \eta_z$	$k_z = \frac{C}{1-\nu} \beta_z \sqrt{BL} \eta_z$
Horizontal	$k_h = \frac{32(1-\nu)Gr_0}{7-8\nu} \eta_h$	$k_h = 2(1+\nu)G\beta_h \sqrt{BL} \eta_h$

Table 7 Definition of η to estimate E.S.S.C⁽¹⁰⁾

Mode of Vibration	r_0 for Rectangular Foundation	Coefficient
Vertical	$\sqrt{BL/\pi}$	$\eta_z = 1 + 0.6(1-\nu)(h/r_0)$
Horizontal	$\sqrt{BL/\pi}$	$\eta_h = 1 + 0.55(2-\nu)(h/r_0)$

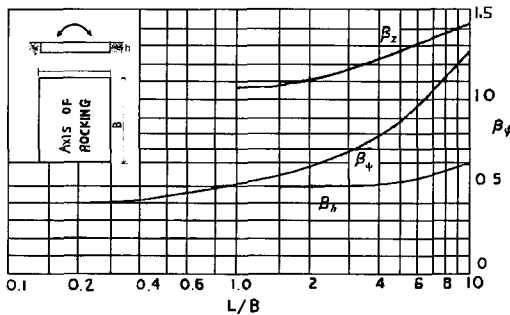


Fig. 7 Definition of β to estimate E.S.S.C⁽¹²⁾

여기서, h : 기초의 근입깊이
 L, B : 사각형 기초의 장변 및 단변 길이
 G : 콘크리트 전단탄성계수, $E/2(1+\nu)$
 E : 콘크리트 탄성계수
 ν : 콘크리트 포아슨 비

본 구조물에서의 가진력은 $F=120 \cdot \sin \omega t$ 와 같은 형식의 정현파를 이용하였다. 회전진동각 속도 ω 는 $2\pi f$ 를 이용하며, 최대진폭은 50Hp 펌프의 바닥 슬래브에 대한 전달함수 및 진동 응답 신호로부터 실험적으로 구한 가진력을 이용하였다. 이 값은 일반적으로 사용하는 방진설계 가진력(펌프중량의 9%~30%)내에도 포함되는 값으로 충분한 의미를 부여하고 있다.

본 구조물은 지반스프링, 바닥 슬래브, 콘크

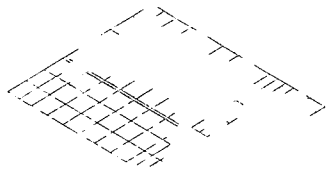
리트 기초, 방진 스프링, 방진가대 및 펌프로 구성되어 있는 구조계의 모델로 되어 있으며, 기계실 바닥 구조계는 매우 큰 강성을 갖기 때문에 그 진동특성도 상당히 고주파수의 고유진동 성향을 가지며, 주로 지배되는 진동모드의 성분은 수직모드로 분석된다. 방진장치를 설치하지 않은 경우 수치 해석에 의한 구조물의 탁월주파수는 Table 8에 나타난 바와 같이 15차(140.9Hz), 19차(157.2Hz), 31차(225.6Hz)등이다. 한편, 펌프의 주요 가진주파수는 1770rpm(29.5Hz)이므로 가진주파수는 본 구조물의 시스템 고유주파수보다 작음을 알 수 있다. 또한, 스프링을 이용하여 방진장치를 삽입한 경우에 대한 해석결과는 Table 9와 같으며, 탁월주파수는 15차(140.9Hz), 18차(157.2Hz), 31차(225.6Hz)등으로 앵커한 경우와 구조전체의 동적특성은 거시적으로는 차이가 없음을 알 수 있으며, 대상 구조물의 진동특성을 나타내는 모드형상은 Fig. 8(앵커)과 같다.

Table 8 Natural freq. & modal participating factor (anchored)

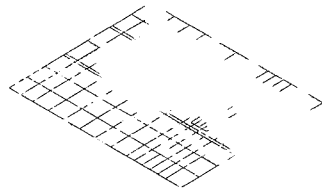
Mode No.	Natural frequency (Hz)	Modal participating factor (percent)
4	78.5	2.5
15	140.9	22.0
19	157.2	8.3
20	160.4	6.9
31	225.6	27.6
42	271.8	6.2

Table 9 Natural freq. & modal participating factor (isolator)

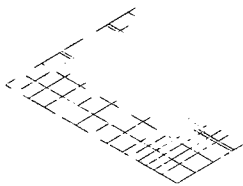
Mode No.	Natural frequency (Hz)	Participating factor (percent)
5	78.3	2.0
15	140.9	22.0
18	157.2	8.2
20	160.4	6.9
31	225.6	27.9
43	271.6	6.3



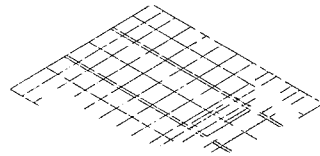
(a) 15th mode (140.9Hz)



(b) 19th mode (157.2Hz)



(c) 20th mode (160.4Hz)



(d) 31st mode (225.6Hz)

Fig. 8 Mode shapes of model

즉, 각 모드와 관련된 진동특성은 앵커를 사용한 경우와 스프링 방진장치를 설치한 경우 유사한 모드형상을 나타내고 있음을 알 수 있으나, 각 지점에서의 수치해석에 의한 진동가속도응답은 Table 10 및 Table 11과 같이 펌프에 의한 진동응답은 방진가대 근처의 국부적인 진동특성변화에 의하여 달라졌음을 알 수 있고, 실측값은 해석값보다 전반적으로 큰 값을 갖고 있음을 알 수 있다. 그러나 결과적으로 나타나는 절대 진동량값의 크기들이 작은 범위에 있으므로 결과들의 활용에는 큰 문제가 없을 것으로 사료된다.

4.4 2자유도계 모델을 이용한 진동응답예측

2자유도계(two-degree-of-freedom system)의 경우 한 질량의 운동은 다른 질량의 운동에 의해 좌우된다. 각 질량들의 실제 변위의 조합으

Table 10 Comparison of acceleration responses by experimental and numerical analysis (anchored)

절점 번호 물리량	방진가대			콘크리트기초			바닥 슬래브		
	실측	해석	이론	실측	해석	이론	실측	해석	이론
A (cm/sec ²)	515	593	552	6.9	5.8	2.6	5.6	2.9	2.6

Table 11 Comparison of acceleration responses by experimental and numerical analysis (spring isolator)

절점 번호 물리량	방진가대			콘크리트기초			바닥 슬래브		
	실측	해석	이론	실측	해석	이론	실측	해석	이론
A (cm/sec ²)	462	427	441	7.4	3.0	2.3	5.4	1.8	2.3

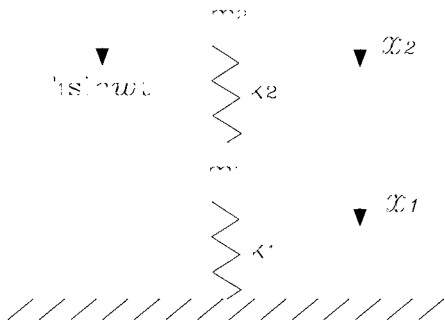


Fig. 9 Two-degree-of-freedom system model

로 이루어져 있으며, 시스템의 운동도 고유좌표계의 중첩으로 나타낼 수 있다. Fig. 9 는 2자유도계 모델을 나타낸 것으로, 감쇠를 고려하지 않을 경우 이의 해는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1(t) &= -k_1 x_1(t) + k_2(x_2 - x_1)(t) \\ m_2 \ddot{x}_2(t) &= -k_2(x_2 - x_1)(t) + F_1 \sin wt \\ m_1 \ddot{x}_1(t) + (k_1 + k_2)x_1(t) - k_2 x_2(t) &= 0 \\ m_2 \ddot{x}_2(t) - k_2 x_1(t) + k_2 x_2(t) &= F_1 \sin wt \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $x_1(t)$ 는 질량 m_1 과 지반 강성 k_1 을 갖는 것으로 모델링한 바닥슬래브의 변위이며, $x_2(t)$ 는 펌프와 방진가대의 변위이다. 조화력 $F_1 \sin wt$ 는 펌프와 방진가대에 가해지는 가진력이며, 변위의 위상이 같다고 가정하면 식 (1)의 정상해는 식 (2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} k_1 + k_2 - w^2 m_1 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 - w^2 m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ F_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$\begin{bmatrix} k_1 + k_2 - w^2 m_1 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 - w^2 m_2 \end{bmatrix} = [Z(w)]$ 이라면 식 (2)는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\therefore [X] = [Z(w)]^{-1} [F] \quad (3)$$

여기서 $[Z(w)]^{-1}$ 은 식 (4)와 같은 형태를 갖는다.

$$\begin{aligned} [Z(w)]^{-1} &= \frac{1}{\det[Z(w)]} \begin{bmatrix} Z_{22}(w) & -Z_{12}(w) \\ -Z_{12}(w) & Z_{11}(w) \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{Z_{11}(w)Z_{22}(w) - Z_{12}^2(w)} \begin{bmatrix} Z_{22}(w) & -Z_{12}(w) \\ -Z_{12}(w) & Z_{11}(w) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} &= \frac{1}{Z_{11}(w)Z_{22}(w) - Z_{12}^2(w)} \begin{bmatrix} Z_{22}(w) & -Z_{12}(w) \\ -Z_{12}(w) & Z_{11}(w) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ F_1 \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{Z_{11}(w)Z_{22}(w) - Z_{12}^2(w)} \begin{bmatrix} -Z_{12}(w)F_1 \\ Z_{11}(w)F_1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

따라서, 방진가대와 슬래브에서의 변위는 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} X_1(w) &= \frac{k_2 F_1}{(k_1 + k_2 - w^2 m_1)(k_2 - w^2 m_2) - k_2^2} \\ X_2(w) &= \frac{(k_1 + k_2 - w^2 m_1)F_1}{(k_1 + k_2 - w^2 m_1)(k_2 - w^2 m_2) - k_2^2} \end{aligned} \quad (5)$$

그러므로 진폭 X_1, X_2 으로부터 시간에 따른 각종응답(가속도, 속도, 변위)을 구할 수 있으며, 수치해석 결과와 이론적해석 결과는 Table 10 및 11과 같다.

Table 10 및 11은 검증된 수치해석 모델을 이용하여 스프링을 이용한 방진장치가 있는 경우와 앵커링을 한 경우에 대한 해석결과를 정리한 것이며, Fig. 10은 이를 도시한 것으로 진동가속도 수준 즉, 앵커로 고정한 경우는 스프링을 사용한 경우보다 큰 전달률을 보이고 진동가속도 응답값도 비교적 크다. 즉, 방진가대로부터 콘크리트 기초까지의 진동차단 효과는 방진스프링을 사용한 경우 99.3%이며, 앵커링을 이용한 경우 99.0%로 큰 차이가 없으며, 방진가대로부터 바닥 슬래브까지의 진동차단효과는 방진스프링을 이용한 경우 역시 99.6%이며, 앵커링의 경우 99.5%로서 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 그러나 앵커링을 한 경우의 바닥슬래브 진동가속도응답은 2.9gal 로서 스프링을 이용한 경우의 1.8gal 보다 크게 나타나고 있어 전반적으로 스프링을 이용한 경우가 진동저감 측면에서 유리함을 알 수 있으며, 이는 실험결과와도 유사함을 알 수 있다.

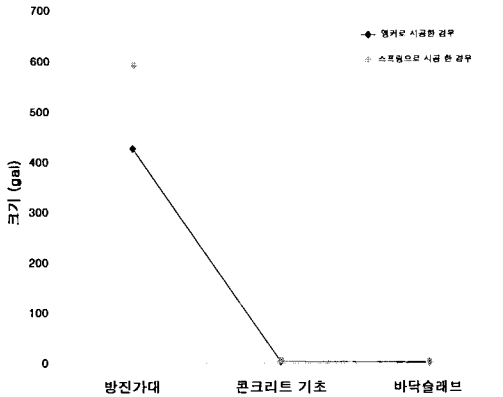


Fig. 10 Comparison of acc. in case of anchored and spring isolator

5. 비교분석

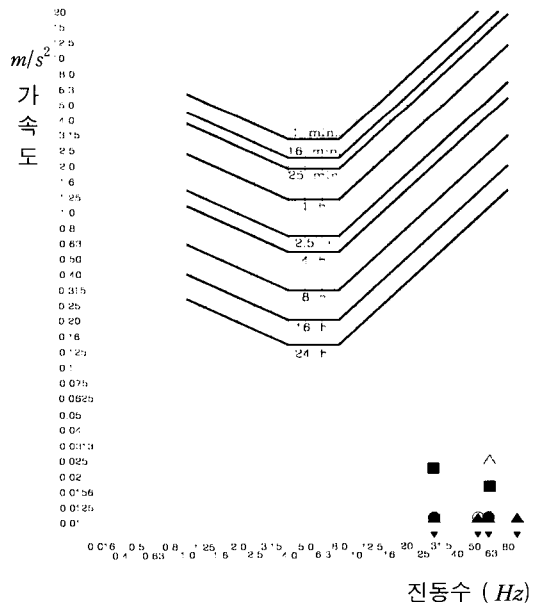
Table 12는 기계실 바닥 슬래브에서의 주파수 영역에서 측정된 진동가속도 값을 정리한 것이며, Fig. 11은 이를 ISO 2631 진동기준도상에 도시한 것으로, 펌프에 의한 진동은 대부분 30 Hz 이상으로서 진동허용범위가 4Hz~8Hz인 경우에 비하여 크기 때문에 본 연구에서 측정된 경우의 진동수준은 Fig. 11에 나타난 바와 같이 상대적으로 매우 작은 값을 나타내고 있다.

Fig. 11에 나타난 바와 같이 방진패드를 삽입한 150Hp의 펌프와 앵커링을 한 100Hp 펌프에 의한 진동수준은 허용진동수준내에 있음을 알 수 있으며, 방진패드를 설치한 75Hp 펌프의 경우 29.5Hz 부근에서의 진동응답이 가장 크게 나타나고 있으나 허용진동범위를 초과하지는 않는 것으로 나타났으며, 50Hp 펌프의 경우 앵커를 사용하여도 진동문제가 발생하지 않음을 알 수 있다.

한편, 구조물의 고유주파수가 펌프진동에 의한 가진 주파수보다 낮을 경우 low tuning 효과가 있으며, 펌프가 지반 위의 콘크리트 바닥 슬래브 위에 설치된 경우와 같이 대상 구조의 고유주파수가 펌프진동에 의한 가진 주파수보다 높은 경우 high tuning 효과를 기대하여야 하며, 지반 위가 아닌 건물내부의 슬래브 위에 설치된 경우 low tuning 효과가 있으므로 이를 고

Table 12 Acceleration at slab according to freq.(gal)

건물 Hz	A	B	C	D	E	EE	F	G	H	HH
29.5	0.32	0.69	5.62	0.05	0.19	2.02	0.05	0.29	0.03	0.003
56.0	-	-	-	-	-	-	0.03	-	-	-
58.0	-	-	-	-	-	-	-	0.15	-	-
59.5	2.48	0.56	0.53	0.04	0.95	1.60	-	-	0.08	0.01
89.0	1.66	0.36	-	-	0.34	0.42	-	-	-	-
92.0	-	-	-	-	-	-	-	-	0.03	0.01
104.0	1.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-
115.0	-	-	-	0.07	-	-	-	-	-	-
118.5	-	-	-	-	0.38	0.64	-	1.95	-	-
120.0	2.51	0.08	0.62	-	0.93	0.16	0.47	0.32	0.02	0.003
148.0	-	-	-	-	-	-	-	1.01	-	-
150.0	-	-	0.27	-	-	-	0.11	-	0.02	0.003
178.5	3.98	10.0	0.64	0.72	2.04	0.48	-	-	-	-
182.5	-	-	-	-	-	-	-	-	0.03	0.003



범례	건물명	범례	건물명	범례	건물명
△	A	●	E	⊗	H
○	B	■	EE	▲	HH
□	C	○	F	▼	0.01이하 인 경우
●	D	⊗	G		

Fig. 11 Vibration level of each bld.

려하여 패드의 사용여부를 결정하여야 한다. 따라서 방진을 위하여 구조의 고유진동수가 높은 경우에는 패드를 사용하는 것보다는 앵커를 이용한 시공이 바람직한 것으로 분석되었다.

6. 결 론

본 연구로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 진동실험과 수치해석적인 분석을 통하여 회전운동이 주인 펌프의 용량이 50Hp 이하인 경우 본연구대상 구조물의 경우 진동제어를 위한 특별한 방진장치 없이 앵커로 시공하여도 사무실 환경진동에 큰 문제가 없는 것으로 분석되었다.
2. 방진을 위하여 구조의 고유진동수가 높은 경우에는 패드를 사용하는 것보다는 앵커를 이용한 시공이 바람직한 것으로 분석되었다.

참 고 문 헌

1. 小野介嗣, 精密防振ハンドブック, フジテクノシステム(株), 1987, pp. 80-472.
2. Bachmann, H. and Ammann, W., "Vibration in structures, induced by man and machine," *Structural Eng. Document*, IABSE\AIPC\IVBH, 1987, pp. 58-66.
3. 변근주, 노병철, 이현주, "전달함수법에 의한 콘크리트슬래브의 동특성 해석", 1993년 학술발표회 개요집(I), 1993, pp. 87-90.
4. 변근주, 노병철, 방춘석, "콘크리트슬래브의 진동제어에 관한 연구", 연세대학교, 산업기술연구소 논문집, Vol. 25, No. 2, 1994, pp. 183-189.
5. 변근주, 노병철, "콘크리트슬래브의 진동제어에 관한 실험적 연구", 대한토목학회논문집, 제14권, 제3호, 1994년 5월, pp. 473-485.
6. 노병철, "진동수응답함수 측정에 따른 펌프가 진력산정", 한국지진공학회, 1999. 4, pp. 103-111.
7. International Standard Organization, "Guide to the evaluation of human exposure to vibration and shock in buildings(1Hz to 80Hz)," Draft Proposed ISO 2631/DADI, 1981.
8. 한국고속철도건설공단, "고속철도 환경소음 기준 및 진동기준에 대한 연구(진동대책편)", 한국고속철도건설공단, 1995. 3, pp. 3-50.
9. 노병철, 이호범, "전달함수를 이용한 펌프(50 Hp)의 진동가진력 산정", 1998년도 추계 한국지진공학회 학술발표회 논문집, Vol. 2, No. 2, 1998. 9, pp. 157-162.
10. Suresh, C. A. et al, *Design of Structures and Foundations for Vibrating Machines*, Gulf Publishing Co., pp. 579-719.