

기계진동에 의한 건축물의 피해방지 방안

Damage prevention countermeasure of the building due to the machine vibration

전 의 식*

조 병 후**

Jeon, Euy-Sik Cho, Byoung-Hoo

Abstract

The interest about noise and vibration is increasing by a living level elevation recently. Particularly, the interest about the influence that vibration of machine has on the safety of building is rising. However, there are a lot of the cases that the influence of machine isn't considered in designing the factory buildings. The purpose of this study is to suggest the results of measuring that the influence of machine's vibration in A factory has on the building structure.

키워드 : 기계진동, 건축물의 안전, 진동수준

Keywords : vibration of machine, safety of building, vibration level

1. 서 론

최근 생활수준 향상으로 환경에 대한 인식이 높아지면서 소음과 진동에 대한 관심 또한 점차로 커지고 있다. 특히, 최근 들어 부실공사에 따른 안전사고가 빈번히 발생함에 따라 건축 구조물의 안전도에 대한 관심이 늘고 있으며, 아파트나 상가, 대규모의 진동에 노출되어 있는 산업체의 종사자들은 주위의 진동에 따른 건축구조물의 영향과 그 안전도에 대해 상당한 우려를 갖게 되었다.

산업체의 경우, 생산공정에서 나타날 수 있는 진동이나 소음은 생산품의 품질에 상당한 영향을 미치고 생산기계 등에서 발생하는 진동에 대해 사전 대책 없이 건설된 건축물은 그 안전성은 물론 근로자들에게 불안감을 주어 생산성 향상에 악영향을 미칠 것이다.

그러므로 건축물 시공시 주위의 소음과 진동 및 건물의 용도를 정확히 분석하고 이를 근거로 안전성과 쾌적한 주위환경을 위해 적절한 대책이 우선되어야 한다. 그러나 건축 설계시 외부소음의 차단에 대해서는 어느 정도 대책을 마련하고 있지만 진동에 대해서는 정확한 상황분석 및 그 대책 자체가 어렵기 때문에, 문제점이 발견되면 진동원을 찾아 방진고무 등을 사용, 수동적으로 대책을 마련하는 것이 보통이다.

따라서 본 연구에서는 A 공장에서 제품을 생산하는 과정에서 성형사출기를 통해 발생하는 충격진동이 건축구조물에 미치는 영향을 평가하여, 그 진동에 대한 건축 구조물의 안전도를 조사하고 진동원을 분석하여 진동방지

를 위한 효과적인 대책을 제시하고자 한다. 또한, 성형사출기를 사용하는 공장 건축물 설계시 본 연구자료가 활용되기를 기대한다.

참고로, 지난 번에 발표한 '기계진동이 건축 구조물에 미치는 영향'¹⁾에서는 기계진동과 슬래브 진동의 상관관계에 대해 분석하였다. 본 연구에서는 보(beam)의 진동 절연 효과를 평가하여 건축물의 진동피해 방지를 위한 종합 대책을 제시하였다.

2. 기계 진동이 건축 구조물에 미치는 영향 평가

2.1 측정 장치 및 방법

본 연구에서는 성형사출기의 진동이 슬래브에 미치는 영향 및 안전성을 조사하고 평가하기 위하여 지반 진동계와 3축 가속도계를 이용한 진동 측정을 행하였다. 그림1은 본 실험을 위한 전반적인 데이터 처리 및 측정 계통도를 나타내고 있다.

그림에서 슬래브의 진동은 가속도 픽업과 진동 레벨미터를 거친 후 데이터 기록계에 저장된다. 한편 각 기계의 진동은 3축 가속도 센서를 이용하여 측정된 후 증폭기를 거쳐 데이터 기록계에 저장된다. 각 진동량은 3축 방향으로 측정되며 신호의 크기에 따라 앰프 및 데이터 기록계에 저장된다. 저장된 데이터는 주파수 분석기에 의해 좁은 대역(narrow band)로 분석되며 컴퓨터에서의 해석을 거쳐 출력된다. 해석 결과는 각 센서의 개인값을 보정한 후 각종 신호처리 프로그램을 거쳐 진동 가속도값, dB값, 옥타브 대역(octave band) 및 등고선(contour plot) 등으로 표현된다.

또한 기계의 동작 시간대에 따라

* 국립 천안공업대학 플랜트설계과 교수, 공학박사

** 국립 천안공업대학 건축과 부교수, 공학박사

표1. 표준 1/3 옥타브 대역 주파수

1/3 옥타브 주파수 (Hz)		
하 한	중 심	상 한
1.41	1.6	1.78
1.78	2	2.24
2.24	2.5	2.82
2.82	3.15	3.55
3.55	4	4.47
4.47	5	5.62
5.62	6.3	7.08
7.08	8	8.91
8.91	10	11.2
11.2	12.5	14.1
14.1	16	17.8
17.8	20	22.4
22.4	25	28.2
28.2	31.5	35.5
35.5	40	44.7
44.7	50	56.2
56.2	63	70.8
70.8	80	89.1
89.1	100	112.2

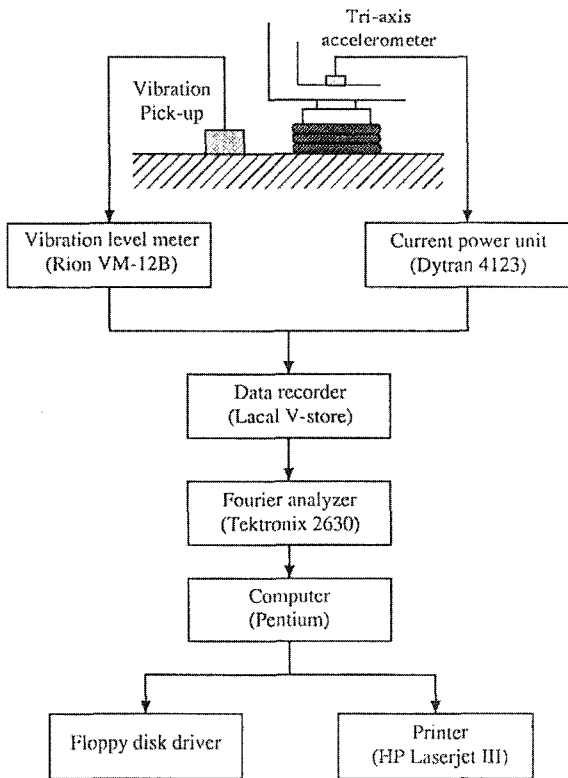


그림1. 신호처리와 데이터 분석의 흐름도

3축 방향의 주파수 특성이 변화되므로 이에 대한 현상을 고찰하기 위하여 1분 동안의 데이터 추이를 워터폴(water fall) 형태로 분석하였다.

데이터 처리에서는 최대 주파수를 500Hz로 하여 분석한 결과 50Hz 이상의 영역에서는 데이터의 특성이 나타나지 않았으므로 최대 주파수를 100Hz로 하여 모든 데이터의 분석을 실시하였다. 또한 측정 결과 10Hz 이하의 저주파 영역에서 주요한 데이터 양상이 나타났으므로 옥타브 분석에 있어 시작 중심 주파수는 1.6Hz로 하였다. 표 1은 표준 1/3 옥타브 대역 주파수를 나타내고 있다.

2.2 측정 항목 및 내용

(1) 슬래브의 진동 영향 평가

본 실험에서는 기계 진동에 의한 슬래브의 영향 및 안정성을 검토하기 위하여 그림2와 같이 건축물의 2층과 3층에서 각각 30개의 측정점을 선정하여 측정하였다. 측정점은 진동 레벨이 클 것으로 예상되는 빔과 빔 사이의 슬래브 면을 위주로 하였으며 각 측정점에서는 3축 방향으로 각각 1분 동안 데이터를 수집하였다.

(2) 기계 진동과 슬래브 진동과의 상관 관계

본 실험에서는 각 기계별로 가진되는 특성과 슬래브에 전달되는 특성을 해석하기 위하여 성형사출기와 슬래브에서 3축 방향으로 진동을 동시에 측정하여 분석하였다.

측정방식은 그림3에 나타난 바와 같이 방진고무가 부착된 성형사출기의 다리 부분에서 기계 진동을 측정하고

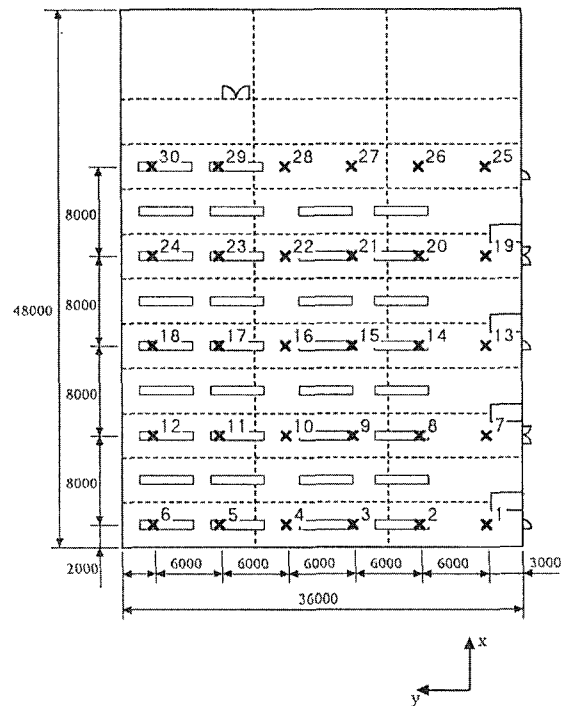


그림2. 슬래브의 진동특성 분석을 위한 측정점과 방향

바로 옆의 슬래브 위에서 지반 진동을 동시에 측정하였으며, 이를 바탕으로 각 기계별로 슬래브에 전달되는 진동 특성과 진동량을 검토하였다. 참고로 그림4와 그림5는 2층과 3층에서 성형사출기의 모델별 기계 배치현황을 나타내

고 있다.

(3) 보의 진동 절연효과 평가

본 실험에서는 슬래브 밑을 지지하는 보(beam)의 진동 절연효과를 평가하기 위해 그림6과 같이 보로 지지되는 슬래브 부위를 25개의 측정점으로 분할하여 측정을 실시하였다.

측정위치는 2층 성형실의 중앙 부위에서 동일 종류의 기계가 운전되는 장소를 선택하였으며, 측정 방향은 슬래브 진동 영향 평가시의 방향과 동일하게 하였다.

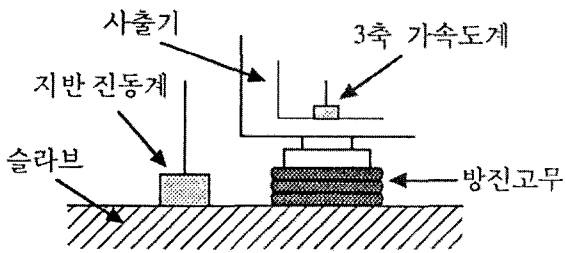


그림3. 기계진동과 슬래브 진동과의 상관관계 분석을 위한 측정점과 방향

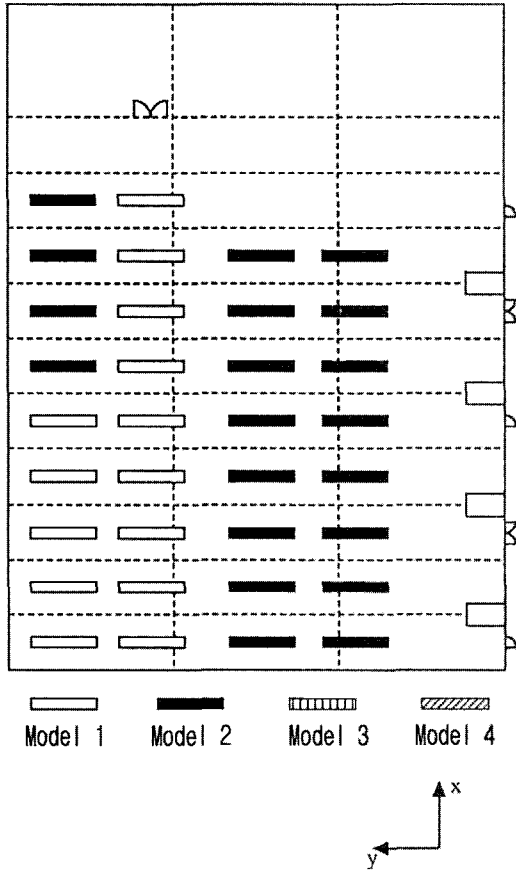


그림4. 성형사출기의 모델별 배치현황 (2층)

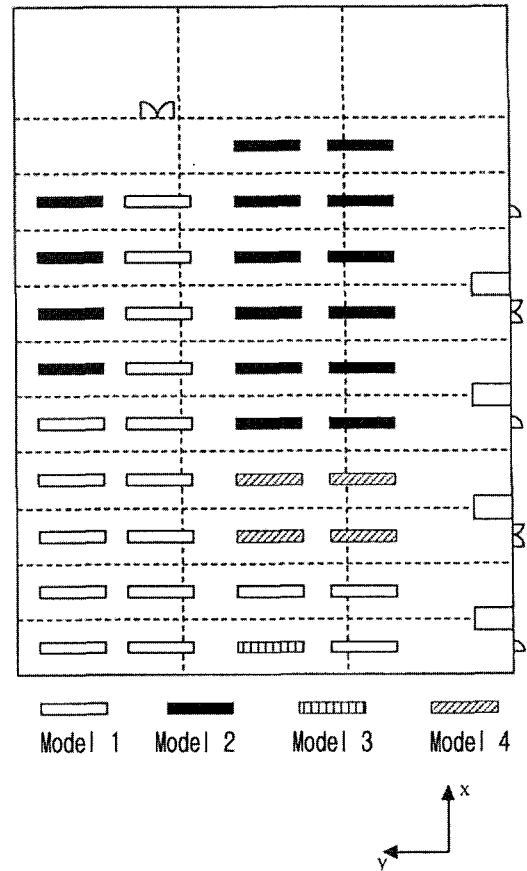


그림5. 성형사출기의 모델별 배치현황 (3층)

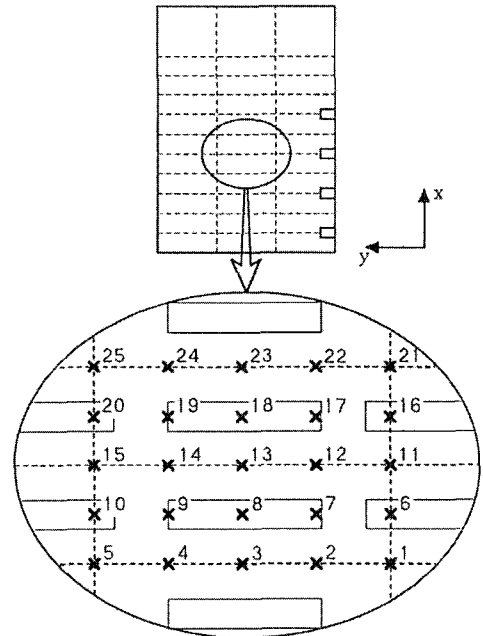


그림6. 보의 진동 절연효과 분석을 위한 측정점과 방향

2.3 안전도 평가 방법

공장과 같은 건축구조물의 안전도를 평가하려면 우선

설계시 강도가 충분히 고려되었는가를 점검하여야 하며, 특히 성형사출기와 같이 큰 하중을 지니며 진동을 유발시킬 수 있는 기계에 대해서는 반드시 동적하중을 고려하여 설계하여야 한다. 본 연구대상인 A 제품공장은 동적하중의 산출 없이 정적하중만을 고려하여 설계되었으므로, 우선 설계시 기초계산으로 잡힌 하중과 슬래브의 강도가 충분한가를 점검하기 위하여 측정된 진동량을 FEM 모델에 입력하여 해석하고자 한다. 슬래브의 최대모멘트와 최대 변위를 구하기 위해 표 2와 같은 물성치를 이용하였으며 구조해석용 소프트웨어인 NASTRAN을 사용하였다.

표2. 슬래브의 물성치

Thickness (mm)	Youn's Modulus (kg/m ²)	Density (kg/m ³)	Poission's Ratio
150	2.1E9	2.4E3	0.17

(1) 기초계산

성형사출기는 이송기의 무게를 고려하여 7,520kg으로 가정하였으며 성형사출기는 그림7과 같이 슬래브의 중앙에 위치하며 8개의 다리에 의해 집중하중이 작용하는 것으로 모델링하였다. 작용하는 하중을 산출하기 위하여 측정된 가속도중 가장 큰 0.3458m/s²을 사용하였다.

성형사출기 + 이송기 하중 : 7,520 Kg
 성형사출기의 다리 : 8 EA
 작용력 = $7,520 \times 9.8 / 8 + 7,520 / 8 \times 0.3458$
 = 9,537 (Kg m/s²)
 산출된 최대 변위 = 2.93165 mm
 상당 작용력 = $7,520 \times (4\pi^2 f^2) \times 2.93165E-3 / (6 \times 4 \times 9.8)$

이 1000보다 작아야 하므로 허용주파수는 16Hz 미만이어야 한다. 기계의 진동이 고주파 성분을 많이 가지고 있어 기초계산에서 LL을 너무 작게 할당하였음을 알 수 있다. 다만 슬래브에서의 측정된 최대가속도는 0.3458 m/s² 정도로 측정되었지만 안심할 수 없어 방진 설비가 필요할 것으로 판단된다.

(2) 슬래브의 모멘트

산출된 모멘트는 +M_x = 1.7155E3, -M_x = -1.63966E3로 슬래브 설계상한치(2,177 kg·m, 1,497 kg·m) 보다 크게 작용하고 있음을 알 수 있다. 그림8은 모델로부터 산출된 모멘트를 등고선으로 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 양 끝단과 1/3, 2/3 지점에서 큰 모멘트가 걸림을 알 수 있다.

그림9는 슬래브의 변형을 나타내고 있다. 이와 같이 성형기를 중앙에 위치한 경우 슬래브 중앙에서 큰 처짐이 발생하므로 슬래브 부위에 보의 보강 없이 올려놓은 것은 매우 위험하다고 사료된다. 더욱이 슬래브의 설계강도가 현재의 부하보다 적게 설계되어져 있으므로 슬래브 부위

의 보강이 필요하다.

3. 측정결과 및 고찰

3.1 슬래브의 진동 영향 평가

본 실험에서는 기계 진동에 의한 슬래브의 진동 형태

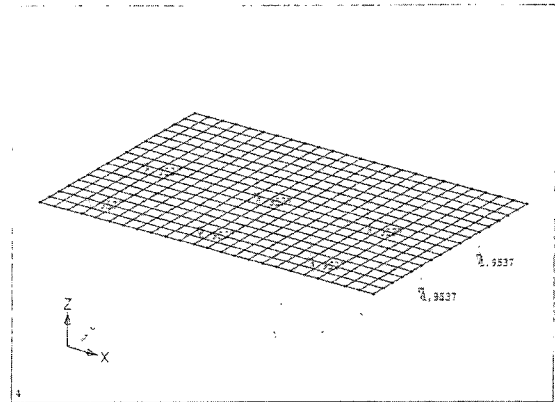


그림7. 슬래브의 FEM 모델

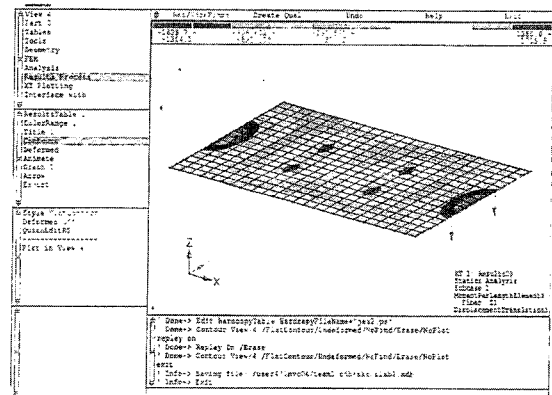


그림8. 슬래브의 모멘트 등고선

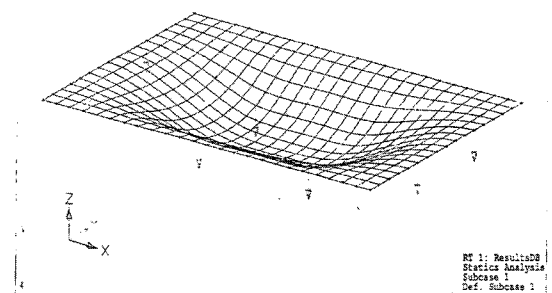


그림9. 슬래브의 변형

및 특성을 파악하기 위하여 2층과 3층 성형실을 그림2와

같이 30개의 측정점으로 분할하여 분석하였다.

측정 데이터 분석결과, z 방향의 진동에 대해서는 리처(richter) 지진계에 의한 진도 평가기준으로 볼 때 인체에 불쾌감을 미치는 영역에 해당되며, 중진(IV)의 범위에 상당하여 건축 구조물에 영향을 미치는 진동 레벨로 평가할 수 있다. 또한 6.3Hz와 오버롤 레벨(overall level)의 최대값은 계측된 측정점이 거의 일치하므로 이 중심 주파수가 건물 전체의 진동에 주요한 영향을 미치고 있다고 볼 수 있다.

한편 오버롤 레벨(overall level)에 대한 등고선을 고찰하여 보면 건물의 벽면 위치와 중앙 부위에서 진동의 영향이 크게 작용하므로 이 부분에 대한 적절한 보강책이 요망되며, 진동 형태로 볼 때 (3,3) 모드에 해당되는 슬래브의 고유 진동수와 일치 여부를 판단할 필요가 있다. 또한 슬래브의 구조상 (3,3) 모드가 6.3Hz 부근에 존재한다면 기계의 가진에 의한 공진현상으로도 파악할 수 있으므로 바닥을 보강하기 전에 이에 대한 충분한 검토가 요망된다.

3층 성형실에 대한 측정결과에 의하면 전반적으로 2층의 진동레벨보다 다소 낮게 측정되었지만 평가기준으로 볼 때 역시 건물에 영향을 미치는 레벨로 판단할 수 있다. 또한 오버롤 레벨(overall level)의 경우 2층의 모드형상과 유사하므로 앞에서 언급된 내용들을 충분히 고려할 필요가 있다고 사료된다.

참고로 측정데이터의 분석결과에 대한 상세한 내용은 '기계진동이 건축 구조물에 미치는 영향¹⁾'을 참조하기 바란다.

3.2 기계 진동과 슬래브 진동의 상관관계

본 실험에서는 기계 진동이 슬래브의 진동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 각 종류별 기계의 다리 부위와 그 주변의 지반에서 진동을 측정하여 비교하였다.

모델 1 성형사출기에 대한 분석결과에 의하면, x, y 방향의 경우는 약 10dB의 진동 절연효과가 있으나 10Hz이하에서의 z 방향 진동 절연효과는 거의 없다고 볼 수 있으므로 슬래브의 주요 가진원으로 작용될 것으로 생각된다.

모델 2 성형사출기에 대한 분석결과에 의하면, x, y 방향에 대한 저감량은 약 10dB로 분석되었으나 z 방향의 경우는 3dB 정도의 저감효과 밖에 나타나지 않는다. 또한 6.3Hz의 경우는 진동 절연량이 거의 없으므로 기계의 진동이 곧바로 슬래브에 전달된다고 볼 수 있으며, 따라서 이 종류의 기계가 설치된 위치에서의 진동량이 크게 나타날 것으로 생각된다. 이 경우에도 10Hz 이상의 주파수에서는 절연효과가 나타나고 있으나 10Hz 이하의 주파수에서는 절연효과가 거의 없다고 볼 수 있다.

모델 3 성형사출기에 대한 분석결과는 다른 기계와 마찬가지로 동일한 양상을 띄고 있다.

모델 4 성형사출기에 대한 3축 방향의 진동측정 결과에 의하면, x, y방향의 오버롤 레벨(overall level)은 방진 고무 및 감쇠 요소 등에 의해 약 20dB 정도 감소하였으나

10Hz 이하의 주파수에서는 효과가 떨어짐을 알 수 있다. 특히 z방향 진동의 경우는 오버롤 레벨(overall level)의 저감량이 10dB 정도로 줄어들었음을 알 수 있다.

따라서 현재 방진고무에 의한 진동 절연효과는 10Hz 이상에서는 어느 정도 나타나고 있으나 10Hz 이하의 주파수 대역과 z 방향의 진동 레벨에 대해서는 거의 효과를 나타내지 못하고 있는 것으로 판단된다.

참고로 측정데이터의 분석결과에 대한 상세한 내용은 '기계진동이 건축 구조물에 미치는 영향¹⁾'을 참조하기 바란다.

3.3 보의 진동 절연효과 평가

본 실험에서는 보(beam)의 진동 절연효과를 평가하기 위해 건물 중앙의 동일 기계 부위에서 슬래브의 진동량을 측정하였다. 측정위치는 그림4와 동일하며 진동레벨은 가속도와 dB로 나타내었다.

표 3~표 5는 3축 방향에 대하여 각각의 중심 주파수에서 최대값을 나타내는 위치와 진동레벨을 나타내고 있다. 도표에서 알 수 있듯이 3축 방향 모두 중심 주파수 6.3Hz에서 최대값을 나타내고 있으며 이 때의 위치는 방향에 따라 동일하지 않게 나타났다. 한편 표 6은 3축 방향에 대하여 오버롤 레벨(overall level)이 가장 큰 위치를 나타내고 있으며 일반적으로 6.3Hz가 최대로 계측된 측정점과 동일하다. 또한 그림10~그림15는 3축 방향에 대하여 최대 진동량을 나타내는 중심 주파수 6.3Hz와 오버롤 레벨(overall level)에 대한 등고선을 나타내고 있다.

위의 결과들에서 알 수 있듯이 z방향의 진동레벨은 보가 지나가지 않는 부위에서 크게 나타나고 있지만 x, y방향의 진동레벨은 반대로 보가 통과하는 부위에서 일반적으로 크게 나타나고 있다.

표3. 중심 주파수별 x축 방향의 최대 진동레벨과 위치

중심 주파수 (Hz)	위 치	진동 가속도	
		m/sec ²	dB
1.6	6	0.0008	38.3
2	6	0.0003	28.4
2.5	20	0.0007	36.7
3.15	20	0.0019	45.5
4	6	0.0071	57.0
5	6	0.0040	52.1
6.3	6	0.0143	63.1
8	6	0.0115	61.2
10	6	0.0059	55.4
12.5	6	0.0077	57.8
16	6	0.0056	54.9
20	6	0.0068	56.7
25	6	0.0029	49.4
31.5	6	0.0042	52.5
40	6	0.0025	48.1
50	6	0.0016	43.9
63	6	0.0026	48.2
80	6	0.0020	46.1

이러한 결과는 성형사출기의 진동을 유발시키는 이송기의

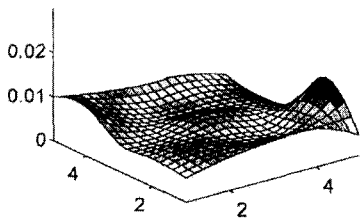


그림10. 6.3Hz 주파수의 x축 방향 진동레벨 등고선

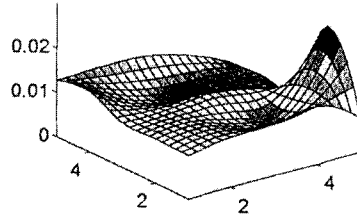


그림11. overall의 x축 방향 진동레벨 등고선

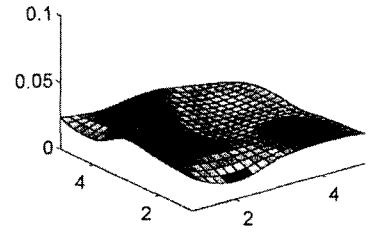


그림12. 6.3Hz 주파수의 y축 방향 진동레벨 등고선

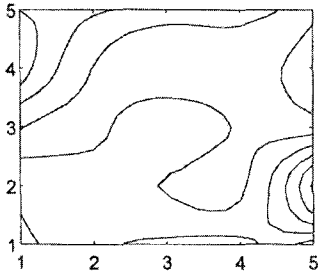


그림13. overall의 y축 방향 진동레벨 등고선

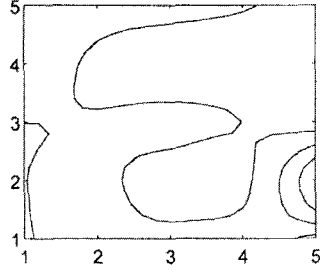


그림14. 6.3Hz 주파수의 z축 방향 진동레벨 등고선

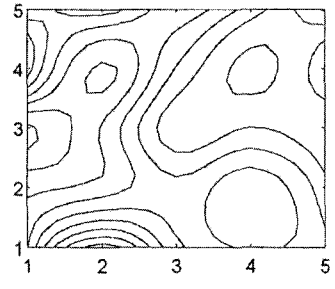
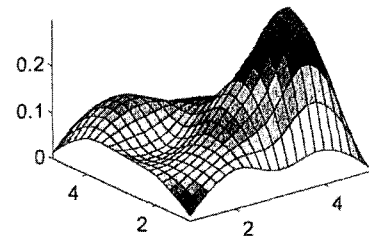
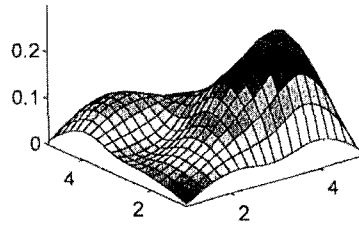
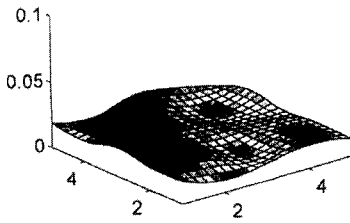


그림15. overall의 z축 방향 진동레벨 등고선



진동 가진력이 x, y방향이기 때문에 이웃한 기계들의 진동 연성 효과가 보를 통해 전달된 것으로 생각할 수 있다. 따라서 보의 설치에 따라 z방향의 진동레벨은 효과적으로 저감시킬 수 있으나 x, y방향의 진동레벨은 저감시키기 어려울 것으로 판단된다. 그러나 결과에서 알 수 있듯이 x, y방향의 진동레벨은 z방향의 진동레벨에 비하여 현저히 낮기 때문에 효과적인 진동 저감을 위해서는 보의 설치가 유효하게 적용될 수 있을 것이다.

한편 그림16은 오버롤 레벨(overall level)이 가장 높은

측정 위치에서의 3축 방향에 대한 옥타브 데이터를 나타내고 있다.

3.4 건축물의 진동피해 방지를 위한 종합 대책안

앞서 분석한 바와 같이 z축의 진동이 가장 지배적이므로 진동원으로 부터의 방진이 요망되어 진다.

- (1) 공기스프링을 이용한 진동원으로부터의 방진설비
그림17에 보인 바와 같이 성형사출기의 하단에 공기스프링을 장착하는 방법이다.

(2) 슬래브 및 보의 보강

슬래브의 두께 및 보를 사용하여 보강한다. 이 때 코르크와 같은 흡진재를 사용하여 진동을 흡수하게하여 주변 성형사출기로의 진동전달경로를 차단하고 성형사출기의 다리를 보가 통과하게하여 z방향의 진동을 보가 차단하도록 한다.

표4. 중심 주파수별 y축 방향의 최대 진동레벨과 위치

중심 주파수 (Hz)	위 치	진동 가속도	
		m/sec ²	dB
1.6	23	0.0007	36.5
2	5	0.0013	42.0
2.5	14	0.0013	42.4
3.15	10	0.0023	47.2
4	14	0.0075	57.5
5	15	0.0146	63.3
6.3	23	0.0224	67.0
8	7	0.1545	63.8
10	5	0.0068	56.7
12.5	7	0.0056	54.9
16	18	0.0035	50.9
20	5	0.0037	51.3
25	10	0.0024	47.8
31.5	5	0.0041	52.3
40	18	0.0023	47.3
50	6	0.0013	42.1
63	7	0.0022	46.9
80	5	0.0012	41.3

표5. 중심 주파수별 z축 방향의 최대 진동레벨과 위치

중심 주파수 (Hz)	위 치	진동 가속도	
		m/sec ²	dB
1.6	7	0.0024	47.5
2	7	0.0029	49.3
2.5	7	0.0072	57.1
3.15	19	0.0158	64.0
4	19	0.0220	66.9
5	7	0.0773	77.8
6.3	7	0.2648	88.5
8	7	0.1811	85.2
10	7	0.0670	76.5
12.5	7	0.0640	76.1
16	7	0.0206	66.3
20	23	0.0237	67.5
25	8	0.0115	61.2
31.5	17	0.0169	64.6
40	7	0.0151	63.6
50	7	0.0150	63.5
63	7	0.0132	62.4
80	7	0.0044	52.8

단, 슬래브의 두께와 재질, 보의 보강으로 인한 추가하

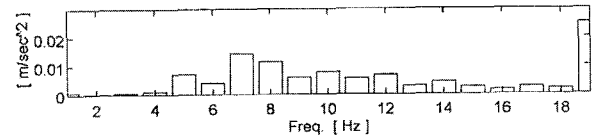
중이 건축 구조물에 미치는 영향 등에 대하여 면밀한 구조적 분석이 요망된다.

(3) 진동량이 큰 부위의 보강 및 지지기둥 보강

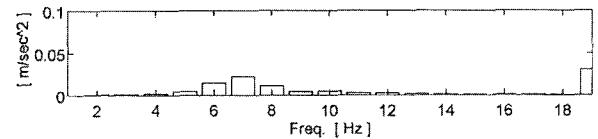
슬래브의 진동영향 평가를 분석한 결과 기둥과 기둥간의 길이가 긴 구간에서 진동량이 현저하므로, 이러한 보를 받칠 수 있는 기둥의 보강이 요망되어진다.

표6. 최대 overall level의 진동레벨과 위치

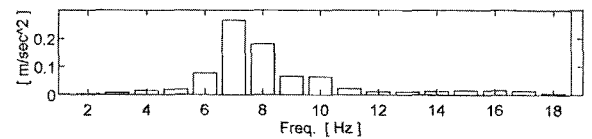
방 향	위 치	진동 가속도	
		m/sec ²	dB
x	6	0.0249	67.9
y	15	0.0304	69.7
z	7	0.3458	90.8



a) x 방향 (#6)



b) y 방향 (#15)



c) z 방향 (#7)

그림 16. 최대 overall level의 옥타브 대역과 위치

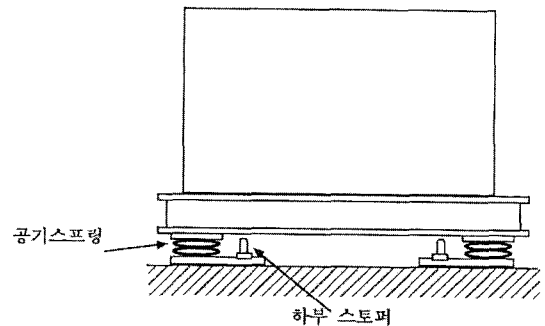


그림 17. 공기 스프링을 이용한 방진설비

4. 결 론

‘기계진동에 의한 건축물의 피해방지 방안’을 제시하기 위해 A 제품공장에 설치된 성형사출기로 인한 건축물의 진동을 측정 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 슬래브의 진동이 설계상한치를 초과하므로 슬래브의 보강이 필요하며, 고주파와 저주파의 동시절연을 위하여 코르크나 고무판 등과 같은 방진재료의 사용이 필요하다.

(2) 기존의 고무에 의한 방진설비 효과는 10Hz 이상에서만 유효함을 알 수 있으며, 10Hz 미만의 저주파를 방진하기 위하여 공기스프링과 같은 방진설비의 도입이 요구된다.

(3) 보가 설치된 부위와 슬래브 부위를 비교 분석한 결과, 보가 지나간 위치에서는 x, y방향의 진동이 주위로부터 전달되어 그 크기가 증가되었으나 z축 방향의 진동은 절연되고 있음을 알 수 있다.

따라서, 보를 방진재료와 함께 사용할 경우 상당한 진동절연 효과가 있을 것으로 사료된다.

(4) 기계진동이 발생하는 제품공장 건축물 설계시에는 사전에 기계진동에 의한 동적하중을 정확히 고려해야 기계진동으로 인한 건축물의 피해를 방지할 수 있다.

참고문헌

1. 전의식 조병후, 「기계진동이 건축 구조물에 미치는 영향」, 한국디지털건축.인테리어학회 논문집, 제3권1호, p.p. 50~58, 2003
2. R. Park, WIL. L. Gamble, 『Reinforced Concrete Slabs』, John Wiley & Sons, 1980
3. C. M. Harris, 『Shock and Vibration Handbook』, McGraw Hill Book Company, 1988
4. 井料政吉, 『騒音.振動便覽』, 新技術開發センター, 昭和53年
5. 『騒音.振動對策事例集』, 日本騒音制御工學會, 平成2年
6. 日本音響材料協會, 『騒音.振動對策ハンドブック』, 技報堂出版, 1982
7. 『壁式構造關係設計規準集・同解説(メーソンリ一編)』, 日本建築學會