

# 건축구조물에서의 공진에 의한 진동발생 사례 및 대책

김 두 훈 · 최 현

(유니슨산업 기술연구소)

## 1. 건축물의 고층화와 동하중 특성

지 늘날 고강도 재료의 사용과 더불어 건축구조분야의 설계 및 시공기술의 발전에 따라서, 초고층건물의 건축이 날로 증가하고 있는 추세이다. 또한, 기능적으로는 주상복합 건물 등과 같이 사무공간과 주거공간이, 또는 공장과 같은 생산공간과 주거공간이 함께 건물 내에 공존하는 복합건물의 건축이 늘어나고 있는 실정이다.

건물에 요구되는 기능적인 측면에서 건물 내에 필요한 각종 유틸리티를 공급하기 위한 각종 기계에서 발생하는 진동 및 소음원의 증가는 생활공간이 함께 존재하는 복합건물에서 적용되는 보다 엄격한 소음 및 진동규제치를 고려할 때, 이러한 초고층건축물의 설계와 시공에는 건물의 진동에 따른 주거성 측면에서 세심한 주의가 요구된다.

건축물의 고유진동수와 동일하거나 근접한 주파수 특성을 갖는 건물 내외의 동하중(dynamic loads)에 대하여 건물에서 발생하는 진동응답이 과대하게 발생하는 현상은 일반적으로 공진(resonance)에 의한 응답증대현상이다.

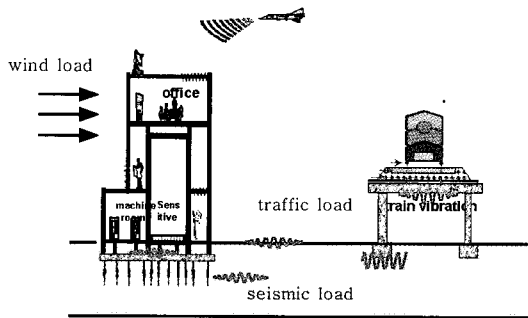


그림 1 건물에 작용하는 여러 동하중

건물 내의 동하중에는 건물의 유틸리티를 공급하기 위한 펌, 컴퓨터서, 냉각타워 등의 회전기계류와 엘리베이터, 에스컬레이터 및 주차시설 등 건물내에 설치되어 운전되는 기계류를 의미하며, 그림 1에서와 같이 건물에 작용하는 대표적 동하중으로서 풍하중(wind load), 지진하중(seismic load)과 교통하중(traffic load)을 생각할 수 있다.

그림 2는 건축물에 작용하는 동하중의 주파수 성분과 크기를 나타내며, 건물에 작용하는 풍하중이 작용하는 주파수 대역은 0.01~1 Hz의 매우 낮은 저주파수 영역이며 크기는 지진하중의 크기보다 작고, 지진하중은 1~10 Hz 주파수 대역에 풍하중 보다는 상대적으로 큰 에너지를 포함하고 있음을 알 수 있다.

건축물이 초고층화에 따라서 건물의 고유진동수는 낮아지며, 이때 풍하중에 따른 건물의 진동에 대한 영향이 건물의 주거성 등에 영향을 주며, 고유주기가 1초 미만의 일반 건축구조물에서는 지진하중에 따른 건물의 진동응답이 중요하다는 사실을 알 수 있다.

건축물의 고층화는 구조적으로는 빌딩이 갖는 건

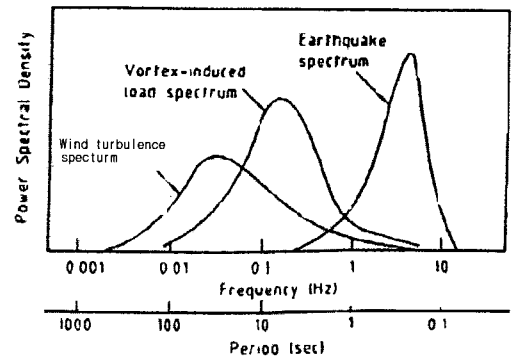


그림 2 건물에 작용하는 외부 동하중의 PSD

표 1 건물의 일반적 댐핑계수,  $\zeta^{(1)}$

Construction type	Damping ratio, $\zeta$		
	min.	mean	max.
Tall building (h >~100 m)			
· RC	0.010	0.015	0.020
· Steel	0.007	0.010	0.013
Building (h ~ 50 m)			
· RC	0.020	0.025	0.030
· Steel	0.015	0.020	0.025

물의 질량과 부재의 구조강성(structural stiffness) 간에 형성되는 1차 유연진동 (flexible vibration) 고유진동수가 실험적으로 결정된 식 (1)에서와 같이 낮아지는 것을 의미한다<sup>(1)</sup>.

$$f = \frac{46}{h} \text{ [Hz]} \quad (1)$$

여기서,  $h$ 는 건물의 높이(m)를 나타낸다.

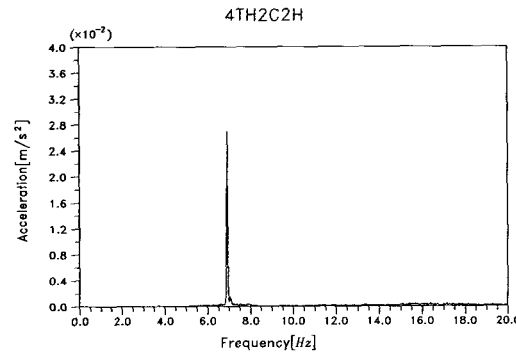
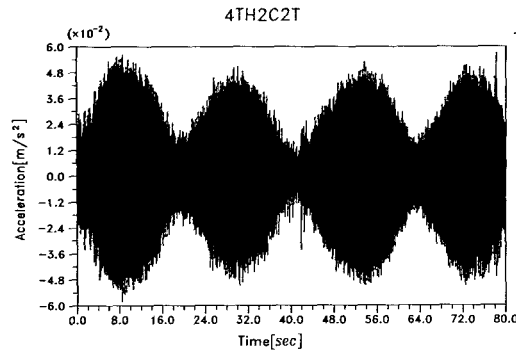
공진상태에서 건축물의 진동응답의 크기를 결정하는 것은 건물의 구조댐핑이다<sup>(2)</sup>. 건물의 댐핑 특성은 표 1에서와 같이 기존의 콘크리트 재료에 비하여 적은 내부댐핑(internal damping) 특성을 갖는 강구조의 소재를 사용함으로써, 건물의 고층화에 따른 유연성 증가와 낮은 댐핑특성으로 인하여 건물 내외의 동적 하중에 대한 건물의 진동 응답이 크며, 시간에 대한 저감효과가 적음을 의미한다. 이는 건물의 강도 및 안전성의 문제와는 별도로 사용성의 문제점에서 다루어질 필요성이 있음을 의미한다.

## 2. 건축물에서 발생하는 공진에 의한 진동사례 및 대책

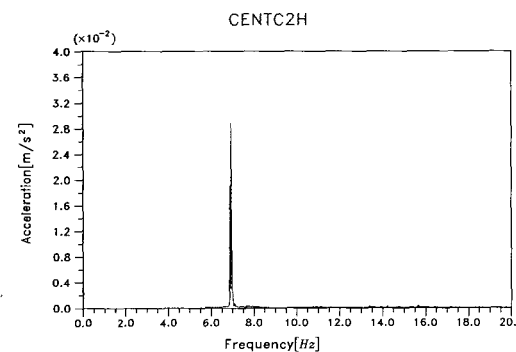
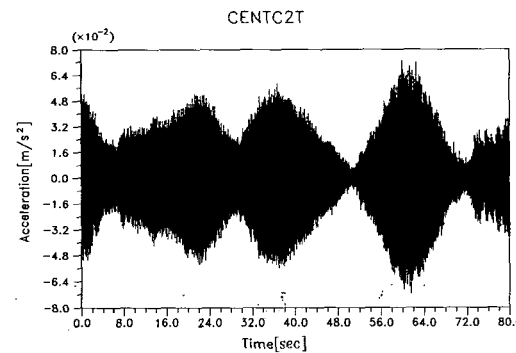
### 2.1 고층건물의 냉각타워에서 발생하는 가진력에 의한 건물내 특정 구조물의 공진

32층 높이의 고층 강구조 주상복합건물의 4층에 위치한 사무실에서 그림 3에서 보는 바와 같은 바닥진동이 지속적으로 발생함으로써 근무자들이 근무 집중도가 저하되고, 심한 경우, 건물붕괴에 대한 불안감도 느끼는 상황이다.

사무실의 바로 아래에는 주상복합건물 상가의 고객의 통행을 위하여 설치된 길이 23 m, 폭 1.9 m의 철재 다리가 설치되어 있으며, 다리구조물은 양방향으로 4개씩의 환풍으로 3층 천장, 즉 진동이 심하게 발생하는 사무실의 바닥에 연결되어 있다. 이 다리는 사용성 측면보다는 건물의 조형



(a) 4층 바닥의 진동



(b) 다리의 진동

그림 3 다리구조물과 4층 바닥에서의 진동수준

미측면에서 설계된 다리이다.

진동스펙트럼에서 다리 및 사무실에서의 진동은 동일한 진동 주파수로 크기만 약간 다르므로 4층 바닥진동 및 다리의 진동은 동일한 진동특성을 갖고 있음을 알 수 있다.

그림 4는 건물내의 여러 위치에서 진동을 측정 한 결과로서, 인도를 제외한 건물내에서는 문제의 7 Hz가 가장 우세한 진동 주파수로 측정되고 있다. 또한, 4층 사무실과 다리 위에서 옥상의 컬럼

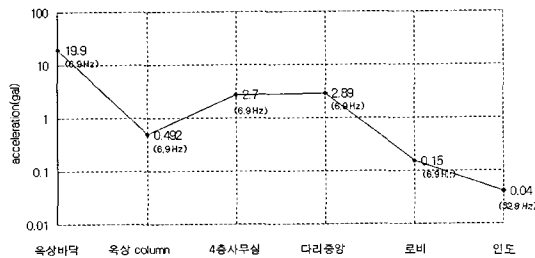


그림 4 건물내 여러 위치에서의 최대 진동수준



그림 5 7 Hz의 다리 구조물 1차 굽힘진동모드

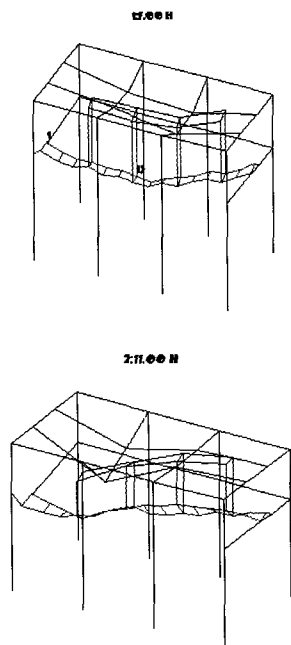


그림 6 다리구조물의 굽힘(7 Hz,  $\zeta = 5.2\%$ ) 및 비틀림(11 Hz,  $\zeta = 5.4\%$ ) 모드형상

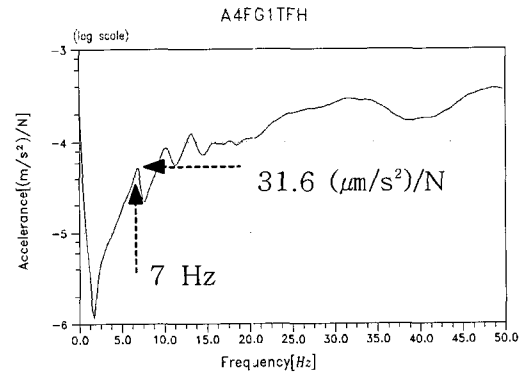
에서 보다 큰 7 Hz 진동이 발생함을 알 수 있다.

다리 위의 진동측정값을 이용하여, 7 Hz 진동 유형을 확인한 결과, 그림 5에서와 같이 1차 굽힘 진동이 발생하고 있음을 알 수 있다.

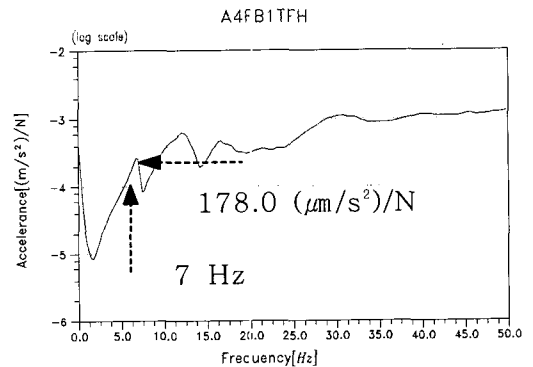
다리의 7 Hz 굽힘진동은 다리와 4층 사무실의 일부분을 대상으로 실시된 임팩트 테스트를 통하여 그림 6에서와 같이 7 Hz에서 다리의 1차 굽힘 모드(1st bending mode), 11 Hz에서 굽힘과 비틀림 모드(2nd bending and twisting mode)가 함께 존재하는 고유진동수가 있음을 알 수 있다.

그림 7은 4층 바닥에서 거더와 빔의 위치에서 바닥의 구조강성을 측정 한 결과로서, 4층 하부에 연결된 다리의 고유진동수가 뚜렷하게 측정되며, 빔에 비하여 거더의 동강성이 5.6배 수준 높음을 알 수 있다. 이는 특정 구조물을 고정할 때, 지지 위치에 따라서 동강성에 큰 차이가 있음을 의미한다.

기계장치의 설치도와 사양을 검토한 결과, 옥상에 위치한 냉각타워 구동모터의 정격회전수가 470 rpm으로, 다리 위에서 측정된 문제의 7 Hz



(a) 거더(girder)



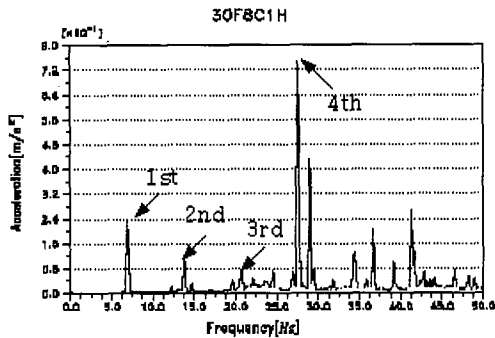
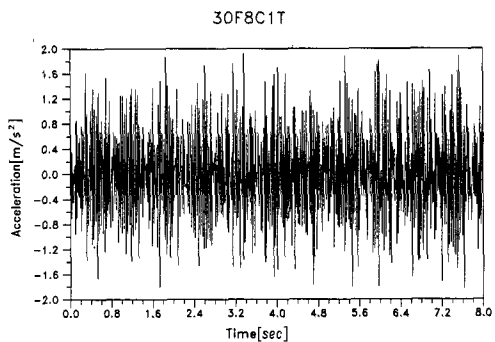
(b) 빔 (beam)

그림 7 4층 바닥에서 측정된 빔 (beam) 및 거더 (girder)의 point accelerance FRF

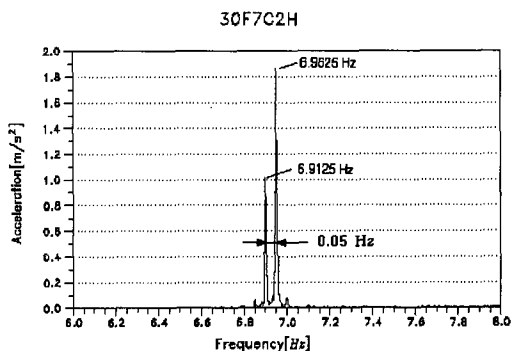
주파수와 일치하며, 설치 위치가 옥상으로서 건물의 횡방향 굽힘모드의 진동과 연관되어 건물전체에 영향을 줄 수 있는 가진원으로 판단된다.

옥상의 냉각탑 배관에서의 진동을 측정된 결과는 그림 3과 같다.

그림 8의 (a)에서 진동신호의 스펙트럼에서 구동모터의 정격회전수의 1차(order)에 해당하는 7 Hz의 주파수와 2배수에 따른 하모닉(harmonic) 성분 주파수가 나타나고 있으며 특히, 냉각 팬의 날개수가 4개이므로 정격회전수의 4차에 해당하는 28 Hz 주파수가 가장 우세함을 알 수 있다.



(a) Vertical direction  
(27.625 Hz-75.0 gal, O.A.:108.4 gal)



(b) Zoom plot(center frequency : 7 Hz)

그림 8 옥탑의 냉각타워 배관에서 측정된 진동

그림 8의 (b)는 7 Hz 주파수를 중심주파수로 zoom mode로 확대하고, 충분한 평균화 처리(averaging)를 거친 결과로서, 7 Hz로 보이는 진동 주파수가 사실은 두 개의 서로 인접한 두 주파수  $f_1=6.9125$  Hz,  $f_2=6.9625$  Hz로 이루어져 있음을 그림 8의 (b)에서 알 수 있다.

0.05 Hz의 저주파 차이는 냉각타워 구동모터간에 약 3 rpm의 회전수차이를 의미하며, 동일 사양의 모터인 경우에도 부하조건 등의 차이에서 발생될 수 있는 회전수 차이로 판단된다.

◎ 진동대책

진동의 원인으로 판단된 냉각타워의 4층 사무실 진동에 대한 영향을 확인하기 위하여 야간에 냉각타워를 정지시킨 후, 다리 및 4층 사무실의 진동이 저감됨을 확인할 수 있었으며, 냉각타워의 배관에 대한 방진을 시도한 결과, 표 2와 같이 기존 진동수준의 1/10 수준으로 감소된 것을 확인할 수 있다.

고층 건축물의 옥상에 위치한 냉각타워는 건물의 1차 굽힘모드를 가진시키기 용이한 곳에 설치된 기계장치이다. 따라서, 냉각타워의 방진과 배관 파이프의 진동절연에 유의하여야 한다.

완공된 건축물의 진동대책으로서 경로 및 수진점 대책을 적용하는 것에는 현실적으로 어려움이 많으며, 따라서 우선적으로 진동원 대책으로서 냉각탑 및 배관 파이프 방진, 냉각타워 구동모터의 밸런싱 상태의 확인 및 조정을 통하여 과도한 동하중이 기계에서 발생하지 않도록 하는 것이 바람직하다.

주상복합 건물 내에는 건물의 기능을 소화해내기 위한 각종 유틸리티와 관계된 수많은 기계들이 운전되고 있으며, 이들 사이에서 정확히 진동원을 파악해내기 위해서는 진동측정 전에 건물 내에 진동원이 될 수 있는 각 기계장치들에 대한 기계 설치도와 장비사양을 확보하고 문제점을 사전에 검토할 필요가 있다.

표 2 냉각타워 배관의 추가 방진 적용 전후의 각 위치별 진동감소 수준 (7 Hz, rms value)

	방진전 (gal)	방진후 (gal)	감소율 (%)
3층 다리 중앙	2.89	0.38	86.6
4층사무실 바닥	2.7	0.31	88.5
30층 main column	0.49	0.06	87.8
30층 냉각탑 배관	183	17.63	90.4

대부분 냉각탑은 옥외에 노출되어 있으므로 온도, 습기 등의 환경영향과 노화특성을 고려하여 배관 방진재의 특성변화를 주기적으로 검사할 필요가 있다.

### 2.2 충격력 유발기계에서 발생하는 가진력에 의한 바닥의 공진

공장건축물에는 생산을 위한 각종 기계가 운전되며, 기계들에서 발생하는 진동원은 기계가 설치된 구조물에 기계가 운전되는 동안에는 다소의 차이는 있지만 항상 동하중을 작용시키게 된다. 특히, 생산설비의 자동화 추세와 더불어 자동화 기계의 성능은 생산성 향상을 위하여 얼마나 빠르게(high speed) 얼마나 정밀한(high accuracy) 작업을 할 수 있는가의 관점에서 기계의 고속화, 정밀화 추세에 있다. 이러한 기계의 고속운전은 필연적으로 진동을 유발하며 따라서, 기계의 운전 특성과 기계가 설치되는 구조물의 구조강성을 고려하여 기계를 설치하여야 하며, 필요한 경우에 별도의 방진대책을 수립하여야 할 필요가 있다.

$t$ 는 이동질량이 일정거리(stroke)를 이동하는데 소요된 시간을 나타내며,  $t_a$ ,  $t_d$ 는 각각 가속 및 감속에 소요된 시간,  $t_c$ 는 등속이동 시간이다.

그림 9에서와 같이 일정한 이송거리를 빠르게 이동하기 위해서는 빠른 가감속 시간을 설정하는 방법과 등속속도를 빠르게 하는 방법이 적용되며, 두 경우 모두 식 (3)에서와 같이 이동질량에 가속 및 감속 시에 큰 가속도가 발생되며, 식 (4)와 같이 이동질량의 질량과 이동질량에 발생한 가속도의 곱에 해당하는 관성력(inertia force)이 필연적으로 발생하게 된다.

$$S = \int_0^t v dt \quad (2)$$

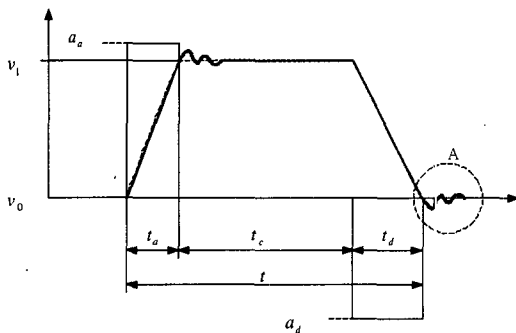


그림 9 속도 프로파일(velocity profile)

$$a_a = \frac{v_1 - v_0}{t_a}, \quad a_d = \frac{v_1 - v_0}{t_d} \quad (3)$$

$$F_d = ma_d \quad (4)$$

특히, 점선원으로 표시된 'A'부분은 이동질량이 정지를 완료한 상태를 의미하며, 이동질량 프레임의 구조강성이 충분하지 못한 경우에는 프레임에도 유연진동(flexible vibration)에 의한 진동이 발생함으로써, 정밀한 작업이 보다 신속하게 이루어지지 못함으로써 장비의 성능을 저하시키는 원인이 되기도 한다.

TV 생산공장에 기판을 생산하는 공정이 이루어지는 자삽라인은 공장 2층에 위치하고 있으며, 그림 10과 같은 형태의 자삽기가 여러대 동시에 작동된다.

PCB 기판에 자동으로 부품을 삽입하는 기계장치인 자삽기는 단위시간당 부품 삽입량을 증가시키기 위하여, PCB내의 부품 홀 간의 짧은 이동거리를 고속으로 움직이며, PCB당 여러 종류의 부품을 삽입하기 위하여 여러 번 이동과 정지를 반복하면서 움직인다. 이때, 기계에서 발생하는 충격성 관성력(inertia force)이 프레임의 체결부, 프레임, 포트(foot)를 통하여 바닥 슬랩(slab)에 전달되며, 바닥의 구조강성이 상대적으로 충분치 못한 경우 바닥에 진동을 유발시키게 된다.

자삽기가 동작되는 동안에 2층 바닥의 진동이 지속적으로 발생한다. 2층 작업공간에 대한 진동 측정결과에서 자삽기가 밀집된 위치에서 진동치가 상대적으로 크다는 것으로 알 수 있었으며, 대부분의 측정위치에서 9.5 Hz와 20.0 Hz 성분이 주된 진동성분으로서, 이는 슬랩에 대한 임팩트 실험을 통하여 바닥의 굽힘 진동모드에 해당하는 고유진동수임을 확인할 수 있었다.

자삽기가 동작하며 발생시키는 충격적 가진력

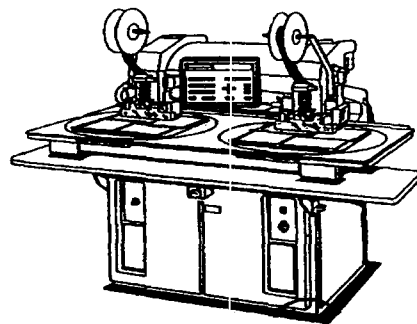


그림 10 자삽기

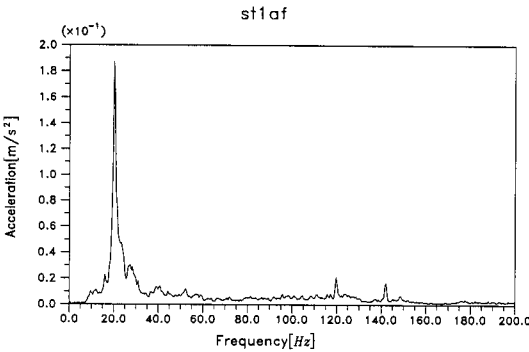
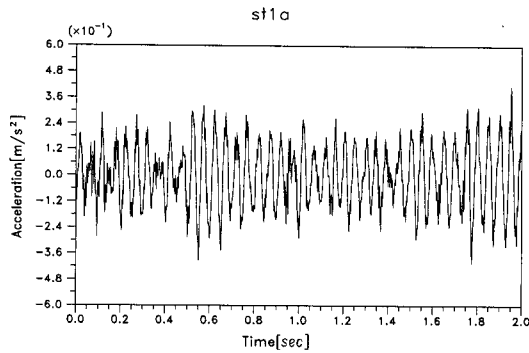


그림 11 자습기 주변의 바닥에서의 수직진동 및 주파수 스펙트럼

이 바닥의 공진을 유발하여 자습기가 동작하는 동안에는 그림 11과 같은 지속적인 바닥진동이 발생되고 있음을 알 수 있다.

◎ 진동대책

진동수준은 작업자의 심리적 불안감을 주는 수준으로서 향후, 생산효율 증대를 시키기 위하여 부품 삽입속도 증가가 증가하면 더욱 큰 동하중이 발생하고 따라서 바닥진동도 증가할 것으로 예상된다. 따라서, 생산현장의 특성을 고려한 적절한 진동방지 대책이 필요하다.

진동저감대책으로 진동원(source) 대책으로는 기계에서 발생하는 충격성 관성력을 감속시킬 수 있는 방법으로서 (1) 이동테이블의 경량화, (2) 이송속도를 낮추고, 가감속 시간을 증가시키는 속도 프로파일의 조정을 고려할 수 있다. 그러나 (1)의 대책은 장비 개발 시에 고려되어야 할 사항이며, (2)의 대책은 장비의 운전속도를 저하시키는 방법으로서 바람직하지 않다.

전달경로(path) 대책으로는 (3) 바닥으로의 힘 전달을 (force transmissibility)을 낮추는 자습기 방진(low tuning)을 고려할 수 있다. 진동을 유발하는 기계의 방진에서 고려되어야 할 사항은 방진에 의하여 바닥으로 전달되는 하중은 저감시

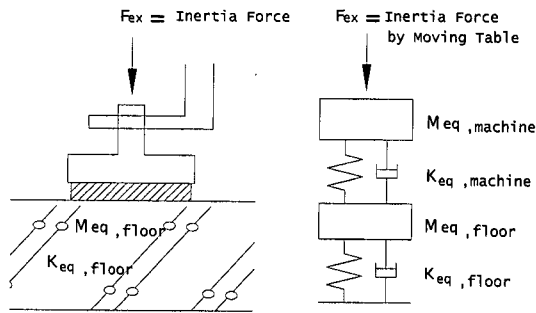


그림 12 진동발생 메카니즘

킬 수 있으나, 이때 장비의 진동응답이 커진다는 문제점이며, 이를 효과적으로 억제시키기 위해서 에너지 소산장치인 댐퍼(damper)를 적절히 사용하여야 한다.

수진점(receiver) 대책으로는<sup>(4)</sup> 바닥구조의 보강을 통하여 바닥의 구조강성을 증가시켜 발생하는 진동을 줄이는 방법을 고려할 수 있다. 그러나 이 방법은 많은 비용과 노력을 요하며, 현실적으로 불가능한 경우가 많다. 따라서, 기계의 특성에 따라서 그림 7에서와 같이 장비의 설치위치 결정 시 바닥의 모빌리티(mobility)가 가장 큰 곳, 즉 거더 또는 빔이 지나는 곳에 설치하는 방법이 바람직하다.

3. 결 론

강구조 건물의 증가 및 초고층화 추세는 필연적으로 건물의 풍하중 및 지진하중에 대한 안정성 및 주거성에 대한 세심한 노력을 요하고 있다. 건물에 작용하는 동하중의 주파수와 건물의 고유진동수가 일치하여 발생하는 건물의 공진은 건물에 과대한 진동이 발생되게 하는 직접적인 원인이며, 이때 건물의 안전성과 주거성을 확보할 수 있도록 설계되어야 한다. 또한, 복합건물에서와 같이 생산시설이 건축물내에 공존하는 경우, 기계에서 발생하는 가진력에 의한 건축물의 국부적 공진상태(local resonance state)에 주의할 필요가 있다.

구조물의 진동을 억제하기 위한 대책으로는 다음의 일반적인 3가지 대책을 생각할 수 있으며, 이를 건축구조물의 내부에 존재하는 진동원에 대한 진동대책으로 적용할 수 있다.

- (1) 진동원(source) 대책
- (2) 전달경로(path) 대책
- (3) 수진점(receiver) 대책

건물외에 존재하는 동하중에 대하여 수진점 대책 차원의 건물진동 응답 저감방안이 고려되어야 하며, 일반적 진동응답 저감 방법으로는 (1) 질량 제어 (2) 댐핑제어 (3) 강성제어 방법이 있다<sup>(3)</sup>.

(가) 강재료로 건축된 고층건물은 건물의 내부 댐핑이 적으므로, 건물의 진동흡수능력이 부족하여 건물 내의 각종 기계에서 발생하는 진동의 전파가 용이하다. 따라서, 전파되는 가진력의 주파수와 건물내의 특정 구조물의 고유진동수와 일치하는 경우 예상치 못한 공진이 발생할 수 있다.

(나) 고층건물의 옥상에 위치한 냉각타워에서 발생하는 가진력은 건물의 1차 고유진동수를 가장 잘 가진시킬 수 있는 위치에 있는 가진원으로서, 건물의 낮은 고유진동수를 매개로 건물 전체에 진동의 확산 가능성이 있으므로 보다 세심한 방진에 대한 주의가 요구된다.

(다) 생산성 향상을 위하여 고속화되고 있는

자동화 기계에서 발생하는 충격성 관성력은 바닥의 공진을 유발한다. 따라서, 기계의 방진을 통해 바닥으로 전달되는 충격력을 최소화시킴과 동시에 기계의 변위를 적절히 제한시킬 수 있는 방안으로 방진이 이루어져야 한다.

### 참 고 문 헌

- (1) Hugo, Bachmann, et, 1994, "Vibration Problems in Structures (Practice Guidelines)", Birkhauser Verlag, pp. 74~76.
- (2) International Conference of Building Officials, 1994, "Uniform Building Code TM", Structural Engineering Design Provisions.
- (3) Ole Dossing, "Structural Testing", B&K, pp. 76~77.