

건물 설비의 진동 대책 및 사례



김 두 훈

고층 강구조 주상복합 건물에서 발생하는 공진에 의한 진동사례 및 대책에 대하여 소개하고, 건물의 기능적인 유틸리티를 제공하는 각종 설비의 진동 방진 대책에 대한 실무를 소개하고자 한다.

최 근들어 강구조 고층건물의 건축이 증가 추세에 있다. 기능적인 측면에서 인텔리전트 빌딩, 주상복합 건물 등과 같이 특정한 용도에 적합하도록 건축된 건물과 사무실과 주거공간 또는 공장과 주거공간이 함께 공존하는 복합형 건물이 많아지고 있다. 강구조의 고층건물은 구조적으로는 빌딩이 갖는 건물의 경량화 질량과 부재의 구조강성간에 형성되는 낮은 고유진동수와 강구조물 소재를 적용함으로써, 기존의 콘크리트재료에 비하여 적은 내부댐핑특성을 나타내게 된다. 이는 건물자체의 유연성(flexibility)은 증가하나, 일단 발생된 진동에 대한 저감효과는 적다. 또한 기능적인 측면에서 건물내 여러 유틸리티를 공급하기 위한 설비에서의 각종 진동 및 소음원의 증가, 생활공간의 공존에 따른 보다 엄격한 소음 및 진동규제 등을 고려할 때, 이러한 설비의 설계와 시공에는 진동 및 소음에 대한 보다 각별한 설계상의 검토가 요구된다.

◆ 건물설비의 진동

공조시스템에 설치되는 각종 회전체 장비, 즉 공기조화기 및 송풍기, 펌프, 냉각탑, 냉동기, 팩케이지 에어컨, 헤파필터유닛 등은 회전부분의

불균형과 장비 가동시 발생하는 기체 및 액체의 운동으로 장비의 불균형이나 기체 및 액체의 소용돌이 혹은 전동기와 연결불량 등에 따라 진동이 발생한다. 또한 이러한 회전장비에 접속되는 덕트나 파이프 배관은 회전장비의 진동으로 진동하는 동시에 그 안을 지나는 유체의 유속, 와류현상, 워터해머현상 등에 의해서도 진동이 발생한다. 이러한 회전기계의 진동은 이들 원인중 회전체의 불평형에 기인한 진동이 대부분을 차지하며, 장비기초에서 바닥으로, 바닥에서 건물구조체로 전달되어 건물구조체음, 즉 고체음을 발생시키는 원인이 된다. 또한 인체에 감각적, 생리적, 신체적 영향을 주어 인체

〈표 1〉 장비 회전수에 따른 최대 변위진폭허용치(ASHRAE 기준)

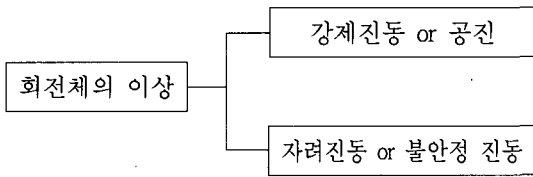
| 장비 | 장비회전수 | 변위 진폭허용치(P-P) | |
|---------|--------------|---------------|-------|
| | | mil | mm |
| 펌프 | 1800 RPM | 2 | 0.05 |
| | 3600 RPM | 1 | 0.025 |
| 원심 콤프레샤 | | 1 | 0.025 |
| 송풍기 | 600 RPM이하 | 4 | 0.1 |
| | 601~1000RPM | 3 | 0.075 |
| | 1001~2000RPM | 2 | 0.05 |
| | 2001RPM이상 | 1 | 0.025 |

* 1 mil = 0.001 inch = 0.025mm

김 두 훈 유니슨산업(주) 기술연구소 연구소장(kimdh@unison.co.kr)

에 불쾌감을 주며 근무의욕을 감퇴시키는 원인이 된다. <표 1>에는 건물 설비의 최대 변위진폭허용치 (ASHRAE 기준)를 나타내었다.

회전기계로부터 발생하는 진동의 형태를 나타내면 <그림 1>과 같다. 진동계의 외부로부터 주기적으로 변동하는 강제외력에 의하여 이상진동을 발생시키는 것을 강제진동이라 한다. 회전계에서 회전수가 상승함에 따라 회전주파수도 증가하며 위험속도(계의 고유진동수) 부근에 도달하면 진동, 진폭은 급격히 증가한다. 이 상태를 공진이라 한다. 강제외력이나 축의 회전주파수와 관계없이 축 자신의 위험속도에 의하여 세차운동을 일으키는 진동으로 동작기계의 떨림진동, 축의 건성 마찰 등이 자려진동에 속한다.



<그림 1> 회전체 진동의 형태

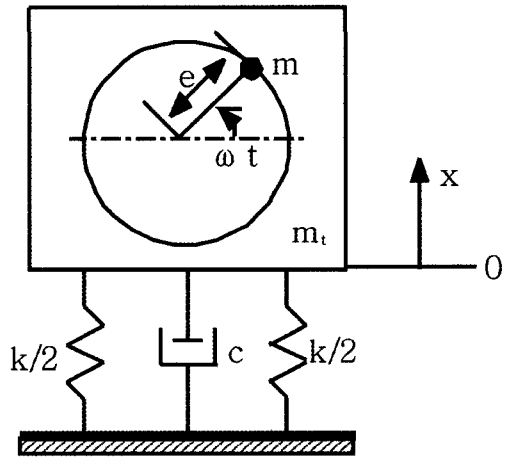
회전체의 불평형에 기인한 진동의 발생은 다음과 같다. <그림 2>와 같이 전체질량 m_t , 회전각속도 w 인 회전체에 회전중심에서 e 만큼 떨어진 거리에 편심질량 m 이 있을 경우 몸통의 위치가 x 일 때 편심질량의 수직위치는 $x + e \sin wt$ 이다. 몸통($m_t - m$)의 수직방향 운동에 대한 운동방정식은

$$(m_t - m)\ddot{x} + m \frac{d^2}{dt^2}(x + e \sin wt) = -kx - c\dot{x} \text{가 된다.}$$

이 식을 정리하면 다음과 같은 운동방정식이 구해진다.

$$m_t \ddot{x} + c\dot{x} + kx = mew^2 \sin wt = F_0 \sin wt$$

상기식은 스프링상수 k 인 스프링과 댐핑계수 c 인 댐퍼로 지지된 질량 m_t 가 외력의 진폭이 $mew^2 (=F_0)$, 각속도가 w 인 정현파 가진력을 받는 경우의 운동방정식과 동일하다. 즉, 편심 e , 편심질량 m 이 존재하는 회전체가 각속도 w 로 회전하면 진폭 mew^2 의 정현파 진동력을 몸통에 가하게 된다. 이 힘이 회전기계가 발생하는 진동력이며 편심량 (me)이 클수록, 고회전하는 기계일수록 심한 진동을 유발한다.



<그림 2> 회전체의 불평형 질량에 의한 진동발생

회전기계의 방진

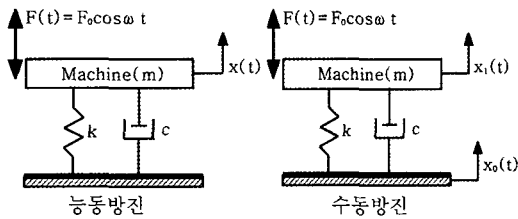
회전기계의 방진에는 기계를 고무패드, 스프링 등으로 탄성지지하여 기계 작동시 발생하는 가진력이 건물의 바닥으로 전달되는 것을 차단하거나 바닥의 진동이 기계로 전달되는 것을 차단하는 방법이 사용된다. 전자의 경우를 능동방진, 후자를 수동방진이라 한다. 능동방진의 경우 회전기계가 작동할 때 발생하는 가진력은 스프링과 댐퍼를 통하여 건물의 바닥으로 전달된다. 강제 바닥(rigid foundation)에 설치되는 기계는 그림 3의 (a)와 같이 1자유도계 시스템으로 구성되며, 기계에 의해 발생된 가진력(F_0)에

● 집중 기획/설비의 소음 · 진동

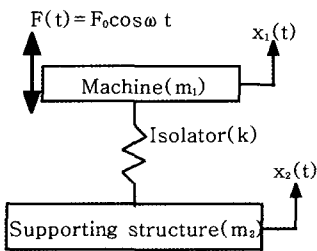
대하여 바닥으로 전달되는 전달력(F_t)의 비인 전달율(Transmission ratio, T_r)은 다음과 같이 표현된다. 수동 방진의 경우 전달율은 바닥의 변위 진폭(X₀)에 대한 기계의 변위진폭(X₁)으로 정의되고 능동방진의 경우와 동일하다.

$$T_r = \frac{F_t}{F_0} = \frac{X_1}{X_0} = \left\{ \frac{1 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \right\}^{1/2}$$

여기서, ω : 기계의 회전 가속도 (= $2\pi \times rpm/60$, rpm: 기계 회전수)
 ω_n : 방진 시스템 고유진동 (= $\sqrt{k/m}$,
 k : 스프링 상수, m : 질량)
 ζ : 감쇠율



(a) 강체 기초(Rigid foundation)



(b) 유연기초(Flexible foundation)

<그림 3> 기초위의 진동방진 시스템

진동방진 시스템이 유연 기초위에 설치될 경우 기계 작동시 기초도 운동하게 된다. 이 경우 그림 3의 (b)와 같은 2자유도계 시스템으로 표현되며, 운동방정식은 다음과 같다.

$$m_1 \ddot{x}_1 + k(x_1 - x_2) = F_0 \cos \omega t$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + k(x_2 - x_1) = 0$$

여기서 기초 바닥에 전달되는 전달력(F_t)는

$$F_t = -m_2 \omega^2 X_2 = \frac{-m_2 k \omega^2 F_0}{[(k - m_1 \omega^2)(k - m_2 \omega^2) - k^2]}$$

이 때 전달율은 다음과 같으며, 시스템의 고유진동수 ω_2 를 적게 할수록 기초에 전달되는 전달력은 작아진다.

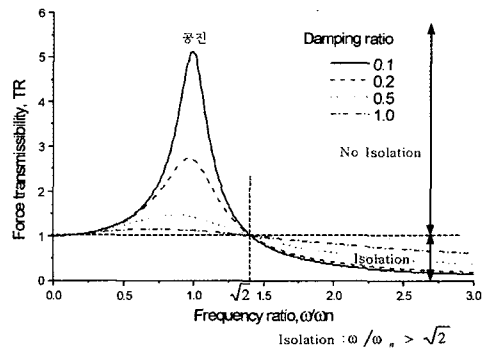
$$T_r = \frac{F_t}{F_0} = \frac{-m_2 k \omega^2}{[(k - m_1 \omega^2)(k - m_2 \omega^2) - k^2]}$$

$$= \frac{1}{\left(\frac{m_1 + m_2}{m_2} - \frac{m_1 \omega^2}{k}\right)} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \left(\frac{1}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_2^2}} \right)$$

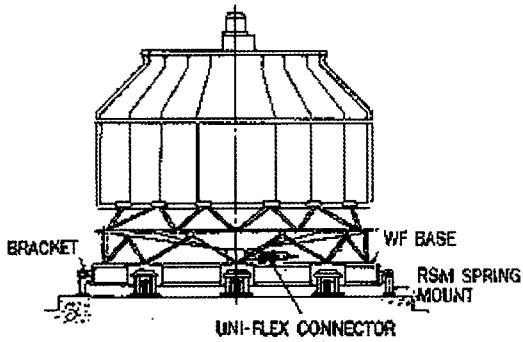
여기서 ω_2 : 시스템의 고유진동수

$$\left(= \sqrt{\frac{(m_1 + m_2)k}{m_1 m_2}} \right)$$

진동 시스템의 전달율을 주파수비에 대한 그래프로 나타내면, <그림 4>와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 주파수비가 $\sqrt{2}$ 이하이면 전달율이 항상 1보다 크게되어 진동을 오히려 증폭시키게 되므로 주의를 요한다. 일반적인 방진의 경우 주파수비를 3이상, 즉, 방진시스템의 고유진동수



<그림 4> 전달율-주파수비 선도



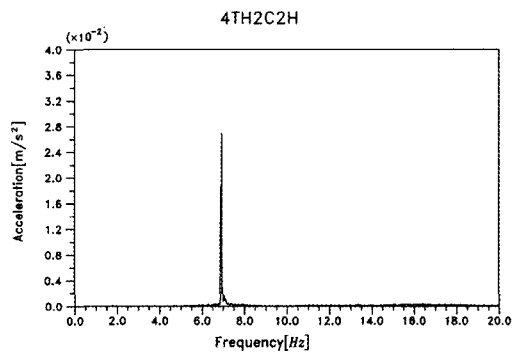
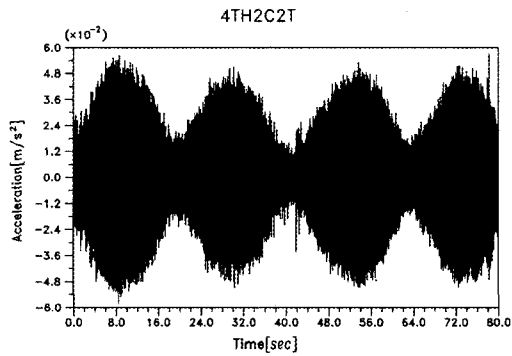
〈그림 5〉 옥상에 설치된 냉각 타워 형상

를 방진 대상기계의 회전주파수의 1/3 이하로 하는 것이 보편적이다.

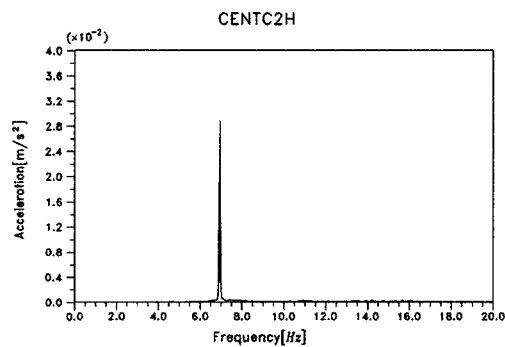
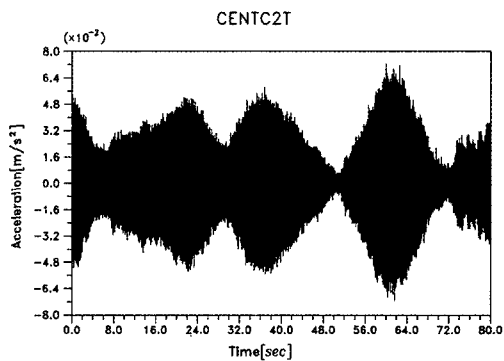
◆ 건축물에서 발생하는 공진에 의한 진동사례 및 대책

진동원 파악

32층 옥상에 〈그림 5〉의 냉각탑이 설치된 고층 강구조 주상복합건물의 4층에 위치한 사무실에서 〈그림 6〉에서 보는 바와 같은 바닥진동이 지속적으로 발생함으로써 근무자들이 근무 집중도가 저하되고, 심한 경우, 건물붕괴에 대한 불안감도 느끼는 상황이다. 사무실의 바로 아래에

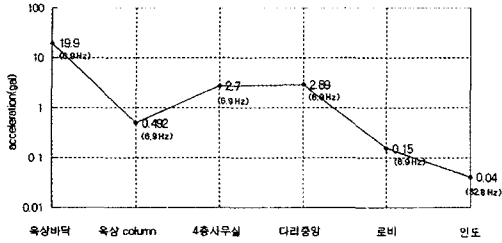


(a) 4층 바닥의 진동



(b) 다리의 진동

〈그림 6〉 다리구조물과 4층 바닥에서의 진동수준



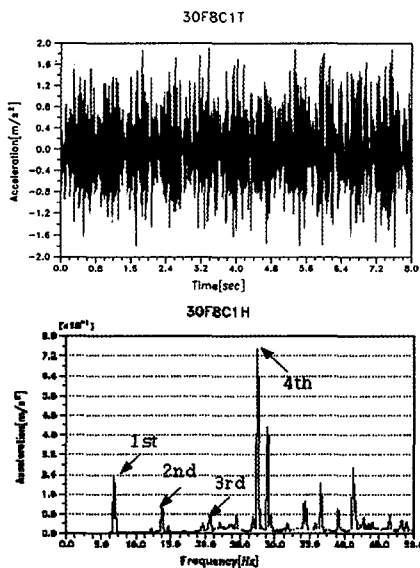
〈그림 7〉 건물내 여러 위치에서의 최대 진동수준

는 주상복합건물 상가의 고객의 통행을 위하여 설치된 길이 23m, 폭 1.9m의 철재 다리가 설치되어 있으며, 다리구조물은 양방향으로 4개씩의 환봉으로 3층 천장, 즉 진동이 심하게 발생하는 사무실의 바닥에 연결되어 있다. 이 다리는 사용성 측면보다는 건물의 조형미측면에서 설계된 다리이다. 진동스펙트럼에서 다리 및 사무실에서 진동은 동일한 진동 주파수로 크기만 약간 다르므로 4층 바닥진동 및 다리의 진동은 동일한 진동특성을 갖고 있음을 알 수 있다.

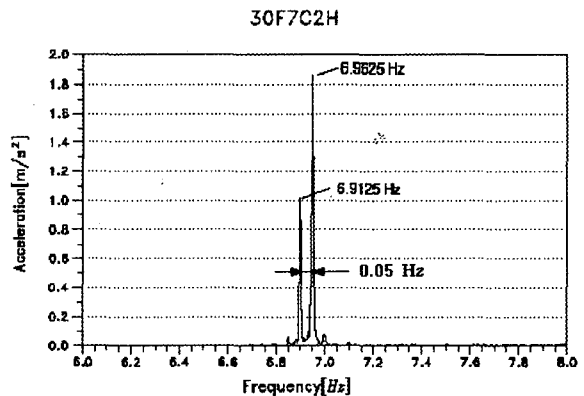
〈그림 7〉은 건물내의 여러 위치에서 진동을 측정된 결과로서, 인도를 제외한 건물내에서는 문제의 7Hz가 가장 우세한 진동 주파수로 측정되고 있다. 또한, 4층 사무실과 다리 위에서 옥상의 컬럼에서 보다 큰 7 Hz 진동이 발생함을 알 수 있다.

기계장치의 설치도와 사양을 검토한 결과, 옥상에 위치한 냉각타워 구동모터의 정격회전수가 470 rpm으로, 다리 위에서 측정된 문제의 7Hz 주파수와 일치하며, 설치 위치가 옥상으로서 건물의 횡방향 굽힘모드의 진동과 연관되어 건물전체에 영향을 줄 수 있는 가진원으로 판단되었다.

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



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



(b) Zoom Plot(Center Frequency :7Hz)

〈그림 8〉 옥탑의 냉각타워 배관에서 측정된 진동

〈그림 8〉의 (b)는 7Hz 주파수를 중심주파수로 zoom mode로 확대하고, 충분한 평균화 처리(averaging)를 거친 결과로서, 7Hz로 보이는 진동 주파수가 사실은 두 개의 서로 인접한 두 주파수 $f_1=6.9125\text{Hz}$, $f_2=6.9625\text{Hz}$ 로 이루어져 있음을 알 수 있다. 따라서 이러한 미소한 0.05Hz 수준의 주파수 차이가 약 40초의 변조주기를 갖고 냉각타워 구동모터의 정격회전수에 해당하는 진동성분을 배관을 통해 건물 전체로 전달시키고 있으며, 이것이 다리 및 사무실에서 간헐적으로 큰 진동을 느끼게 된 원인임을 알 수 있었다. 0.05Hz의 저주파 차이는 냉각타워 구동모터 간에 약 3 rpm의 회전수차이를 의미하며, 동일 사양의 모터인 경우에도 부하조건 등의 차이에 따라서 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, 빌딩 컬럼에 고정된 냉각타워의 배관을 방진패드로 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 파이프의 방진, 냉각타워 구동모터의 밸런싱 상태의 확인 및 조정을 통하여 과도한 동하중이 기계에서 발생하지 않도록 하는 것이 바람직하다. 주상복합 건물 내에는 건물의 기능을 소화해 내기 위한 각종 유틸리티와 관계된 수많은 기계들이 운전되고 있으며,

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

| | 냉각탑 7Hz 성분 | | | Over All Value | | | 냉각탑정지시 진동 |
|------------|------------|---------|-------|----------------|---------|-------|---------------------------|
| | 공사전 gal | 공사후 gal | 저감율 % | 공사전 gal | 공사후 gal | 저감율 % | |
| 3층 다리 중앙 | 2.89 | 0.38 | 86.6 | 3.82 | 0.93 | 75.7 | 7Hz-0.12gal, O.A.:0.24gal |
| 4층 사무실 바닥 | 2.7 | 0.31 | 88.5 | 3.56 | 0.66 | 81.5 | - |
| 30층 냉각탑 배관 | 183 | 17.6 | 90.4 | 210 | 23.6 | 88.8 | - |

* 1차 측정 : 1, 3호기 가동
 2차 측정 : 1, 2, 3호기 가동
 다수의 측정위치중 최대진동수준을 나타냄
 Frequency span : 0~50Hz
 ISO 사무실 진동기준 2.0gal(o-p), (gal = cm/sec²)

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

◆ 각종 장비의 방진 실무

다음은 현실적으로 현장에서 많이 시행되고 있는 주요 방진 방법을 소개하고자 한다.

왕복동식 냉동기 방진장치

기초높이는 200mm이상으로 하며, 최하부층 및 6m SPAN 까지는 19.05mm, 9~12m SPAN 까지는 38.1mm의 변위량을 가진 RSM 제한형 스프링 마운트로 격리시키고, 파이프 배관에는 UFTC 네오프렌 후렉시블 콘넥터를 설치한다.

냉각탑 (대향류형, 직교류형, 밀폐형, 증발형) 방진장치

직교류형 기초는 200~500mm 높이로 독립기

초로 하고, 밀폐형 기초는 150~200mm 전면기초로 한다. 지반층에 설치될 때는 19mm 두께의 USWP 네오프렌 패드로 격리시킨다. 한편 냉각탑 Fan의 회전수에 따라 회전수가 300rpm 이하일 때, 최저 회전수의 40%에 해당하는 고유진동수를 가진 RSM 제한형 스프링 마운트로 격리시키고, 회전수가 301~500rpm 일 때, 12m SPAN 까지는 최소 63.5mm의 변위량을 가진 RSM 제한형 스프링 마운트로 격리시킨다. Fan 회전수가 501rpm 이상이고, 6m SPAN 일 때는 19.05mm, 9m & 12m SPAN은 38.1mm의 변위량을 가진 RSM 제한형 스프링 마운트로 격리시키고, 파이프 배관에는 UFTC 네오프렌 후렉시블 콘넥터를 설치한다.

공조기 방진장치

기초높이는 150mm 전면기초로 한다. 또는 UJM 작업 장치를 기초로 대신한다. 최하부층의 경우 최소 19.05mm의 변위량을 가진 SMB (KSB 1563) 또는 HSM하우징형

스프링 마운트로 격리시킨다. 바닥 SPAN 길이가 6m이상일 때는 콘크리트 베이스를 사용하여 최소 38.1mm의 변위량을 가진 HSM 하우징형 스프링 마운트로 격리시킨다.

한편, fan part가 분리된 공조기는 밀림힘이 발생하므로 HTR 수평밀림방지기를 설치하여 장비가 운전 및 정지시 발생하는 밀림현상을 차단하여야 하며, coil 및 filter mixing part도 기류의 마찰진동이 발생하므로 19mm 두께의

USWP 네오프렌 패드로 격리시킨다.

송풍기 방진장치

송풍기는 다음과 같이 전면기초로 한다.

| SS | DS | 기초높이 |
|-----------|-----------|-------|
| UP ~ #6 | UP ~ #3 | 100mm |
| #7 ~ OVER | #4 ~ OVER | 200mm |

fan의 회전수가 500rpm 이하 일 때는 최소 38.1mm의 변위량을 가진 HSM 하우징형 스프링 마운트로 501rpm이상 일 때는 최소 19.05mm의 변위량을 가진 SMB 또는 HSM 하우징형 스프링 마운트로 격리시킨다.

펌프 방진장치

기초는 바닥마무리면에서 높이 150~200mm를 표준으로 하고, 콘크리트 베이스를 설치하며 이때 콘크리트 베이스 중량은 장비 중량의 최소 0.1배 이상이어야 한다.

흡입측의 엘보우 받침대는 콘크리트 베이스 내에 둔다. SPAN길이가 6m 까지는 최소 19.05mm의 변위량을 가진 SMA (KSB 1563) 또는 OSM 개방형 스프링 마운트로 격리시키고, SPAN 길이가 9m까지는 38.1mm의 변위량을 가진 OSM 개방형 스프링 마운트로 격리시킨다. 파이프 배관에는 UFTC 네오프렌 후렉시블 콘넥터를 설치한다. 