

## 클린룸과 미소진동(Ⅱ)

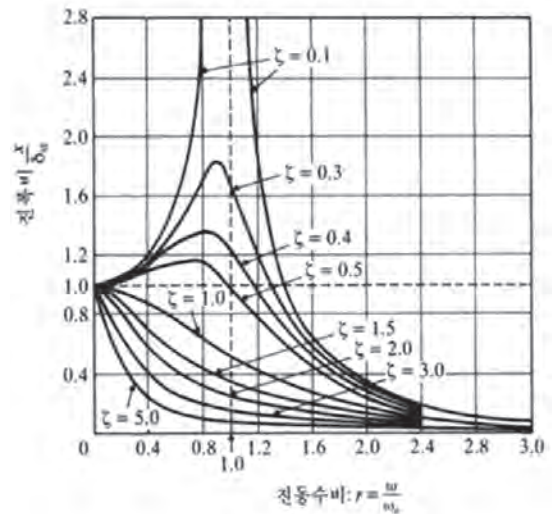


조 동 진 총무수석  
(주)세진구조이앤씨 대표이사

클린룸과 미소진동이라는 주제로 2회에 걸쳐서 기고하기로 하였고 본 고는 두 번째 칼럼입니다.

일본에서는 한때 미진동을 제어하는데 적합한 구조방식이 유구조(flexible structure)냐, 강구조(stiff structure)냐에 대한 논란이 있었다. 아래에 그림은 동역학수업에서 맨 처음에 배우게 되는 소위 공진그래프이다.

횡축은 진동수비로서 외력의 진동수를 계의 고유진동수로 나눈 값이므로 외력의 진동수가 영인 경우 진동수비는 영이 되고, 진폭비(동적변위를 정적변위로 나눈 값)는 1이 된다. 이 경우는 외력이 진동하지 않는다는 것이므로 동적인 문제(dynamic problem)이 아니라 정적인 문제(static problem)인 것을 의미한다. 그림에 나타낸 것처럼 공진을 피하기 위해서는 왼쪽 또는 오른쪽에 위치해야 하는데, 왼쪽으로 피하는 것(강구조)보다는 오른쪽으로 피하는 것(유구조)이 유리하고 큰 효과를 볼 수 있는 것처럼 보인다.



[그림 1] 공진그래프

실제로 진동문제에서 이러한 방식을 채용하는 경우가 없다는 것은 아니지만(오히려 더 많이 사용하는 방식이다) 미진동의 문제에서 건축구조물을 유구조로 만들어서 공진을 피하는 것은 생각하기 어려운 것이다. 진동의 문제는 근본적으로 공

진의 문제인데 미진동에서는 정밀장비가 설치되는 바닥에 영향을 미치는 외력의 종류와 진동수는 너무나 다양하여 가진진동수는 매우 넓은 대역에 걸쳐져 있으며, 바닥구조가 갖는 계의 특성은 캔틸레버 구조의 횡방향 진동처럼 특정 진동수나 영역이 지배적이 되지 못한다는 것이다. 즉 근본적으로 공진을 피할 수가 없다. 공진은 피할 수 없는데 어떤 진동수대역에서 공진이 발생하도록 하는 것이 유리한가의 문제가 된다면 말할 것도 없이 고진동수 대역에서 공진이 발생하도록 유도해야 하는 것이다.

구조의 강성을 최대한 높여서 일정 진동수 이하에서는 공진이 발생하지 않도록 하여야 한다. 저진동수 대역에서 공진이 발생하게 되면 우선 구조자체의 강성이 작은 것이므로 진폭이 커지며, 거리에 따른 감쇠가 작아져서 정밀장비가



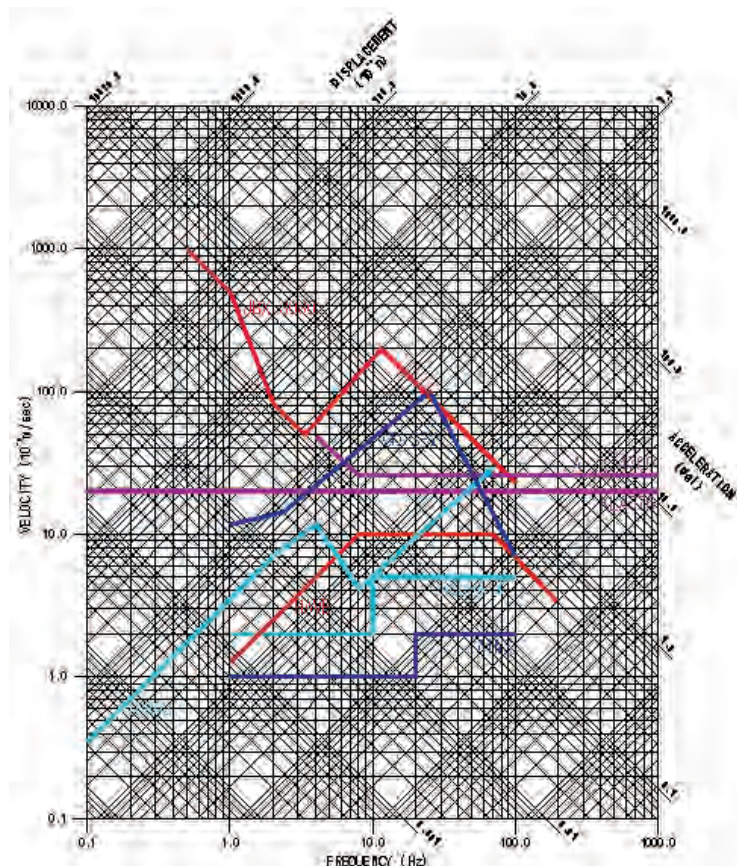
지 도달하는 진동값이 크다. 또한 정밀기기에 미치는 영향은 기기의 특성에 따라 다르지만 보통은 저진동수에 더 예민하고 유해한 경우가 많다. 일반적인 오피스 건물에서 바닥구조의 수직방향 1차 고유진동수는 5~10Hz정도인데 반하여 클린룸 구조 바닥의 고유진동수는 10~20Hz로 구성된다. 고유진동수는 간단히는 강성을 질량으로 나눈 값의 제곱근인데 건축구조의 경우 재료가 대체적으로 정해져 있으므로 강성을 높게 가져가려면 단면이 커져 질량도 따라서 증가한다. 또 나눈값에 제곱근을 취하게 되므로 실제 고유진동수를 10% 증가시키려면 단면이 상당히 커져야 한다.

### 3. 진동원과 허용진동기준

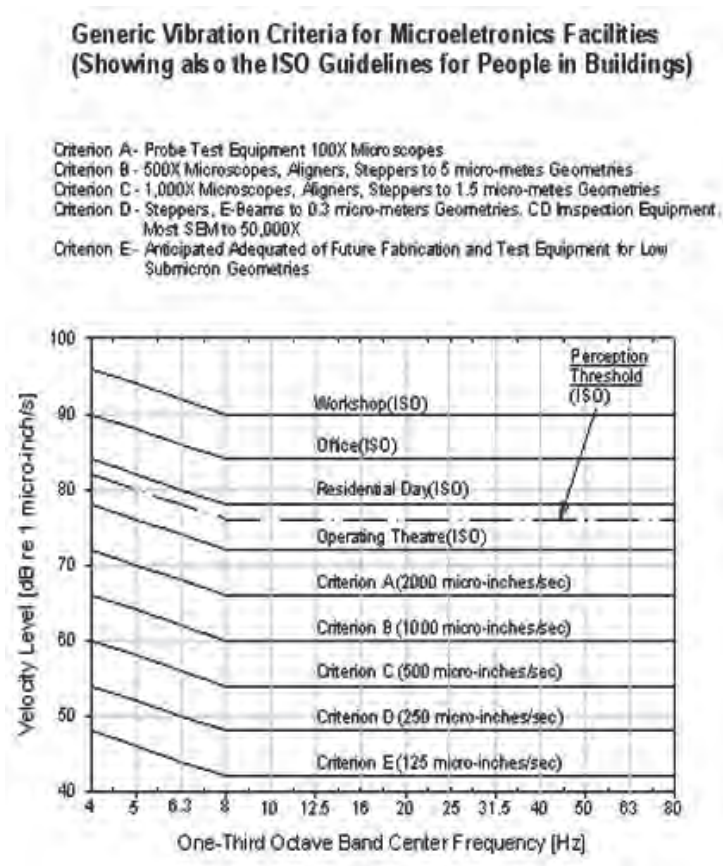
건축물의 구조설계에서는 외력과 내력의 산정방법이 기준으로 제시되므로 이에 따라서 설계를 진행하게 된다. 미진동환경이 필요한 정밀시설을 짓기 위해서도 마찬가지로 가이드라인이 있어야 하며, 그 기준은 진동원과 허용진동기준이다. 허용진동기준은 말 그대로 정밀장비에 허용되는 진동수준을 말하는 것으로 장비의 제조사에서 제공하는 것이다. 정밀장비는 각 장비별로 허용진동기준이 제시되며 진동설계를 하는 엔지니어는 장비가 설치되는 바닥의 진동이 허용진동기준을 넘지 않도록 설계하면 되는 것이다. 한번은 외국계 회사의 반도체공장을 진동설계하였는데 별로 크지도 않은 클린룸이지만 클래스10 정도의 높은 수준이었으며 진동기준을 달라고 하니 내부에 들어가는 정밀장비들에 대하여 각각 허용진동기준을 보내와서 진동기준을 분석하는데도 한참 걸렸던 경우도 있었으나, 반하여 어떤 경우에는 허용진동기준 같은 것은 잘 모르겠으니 알아서 잘 해달라는 말을 듣는 경우도 있다.

왼쪽 그림에 나타난 허용진동기준은 클린룸 설계 시 장비별로 보내온 허용진동기준을 분석하여 하나의 그래프에 표시한 것이다. 인접위치로 계획된 장비들도 각각 허용진동값과 대역이 달라서 진동설계는 더 복잡하게 된다.

각각의 정밀장비에 대한 진동기준이 명확하게 제시되지 않고 클린룸 전체에 대하여 하나의 기준이 제시되는 경우가 더 많다. 전체에 대한 하나의 기준이 제시되고 별도의 한두 가지 장비에 대하여 추가적인 진동기준이 제시되는 경우도 있으며 이런 경우 추가로 제시되는 장비



[그림 2] 장비별 허용진동기준 예



[그림 3] 정밀장비의 허용진동기준과 일반시설의 진동기준 비교

많다. 진동기준이 주어지지 않는 경우에는 <그림 3>에서처럼 각 BBN기준의 각 진동등급에 해당하는 일반적인 장비의 정밀도 수준이 제시되어 있으므로 이를 참조하면 된다.

진동설계를 하는데 있어서 두가지 가이드라인이 허용진동기준과 진동원이라고 한다면 진동원은 훨씬 더 복잡한 문제로서 일단 허용진동기준은 주어지지만 진동원은 주어지지 않는다. 클린룸 내에서 정밀장비에 영향을 미치는 진동원은 매우 다양한데 크게 구분하면 네가지로 나누어 볼 수 있을 것 같다.

첫째는 건물외부에서 오는 진동으로 건설진동, 교통진동, 다른 건물에서 발생하는 진동이다. 이것은 시설의 입지와 관련된 것으로 입지조건에서 아예 배제하고 시작할 수 있으나 진동설계자의 요구에 의해서 변화될 수 있는 경우는 거의 없다고 보아야 한다. 만일 VC-D등급이나 VC-E등급 정도의 시설을 설계하는 경우에는 예정부지에 시설이 건설되기 이전에 반드시 입지의 상시진동값을 측정해 보아야 한다. 경험상으로는 대부분 이 정도의 진동기준이 요구되는 경우에는 입지의 상시진동값이 벌써 허용진동값을 초과하는 경우도 많아서 진동설계에 외부진동의 내부전달을 고려해야 한다.

두 번째는 각종 설비들로부터 발생하는 진동이다. 클린룸은 공조를 위한 설비들이 배치되는데 클린룸의 클래스가 높아질수록 설비의 부하가 커지게 되며, 설비의 배치 및 제원을 파악하는 문제는 가장 중요한 부분 중 하나이다. 물론

는 클린룸 내에서 가장 예민한 장비이다.

<그림 3>에 나타낸 것은 클린룸 구조에서 가장 많이 사용하고 있는 진동기준을 일반 시설에 대한 ISO의 진동기준과 비교하여 나타낸 것이다. 미진동기준은 가장 엄격한 등급인 VC-E부터 VC-A등급까지 구분되며 1970년대에 BBN이라는 회사에서 만든 것이다.(VC는 Vibration Criteria의 약자로서 진동기준이라는 의미이다. 그러므로 VC기준이라고 해서는 안되지만 일반적으로 VC-B기준이라고 부르는 경우가 많다.)

기준의 형태는 8Hz이하에서는 등가속도 기준, 8Hz이상에서는 등속도 기준으로 되어 있으며 각 등급 간의 차이는 보이는 것처럼 두배이다. 비교적 정밀장비의 평균적인 특성이 잘 반영된 것으로 인식되어 특히 우리나라에서 정밀시설에 대한 기본적인 진동기준으로 가장 많이 사용되고 있어 공장에 대한 진동설계를 시작할 때 “이 시설은 진동기준이 VC-C등급”처럼 주어지는 경우가



정밀기기와 가진력이 되는 설비의 레이아웃이 중요한 문제이기는 하나 일반적으로는 가장 큰 가진력으로 가장 큰 진동원이 되는 경우가 많다. 설비와 정밀장비의 레이아웃도 생산라인의 흐름에 따라 배치가 결정되므로 진동설계자의 요구로 변경할 수 없다고 보아야 한다.

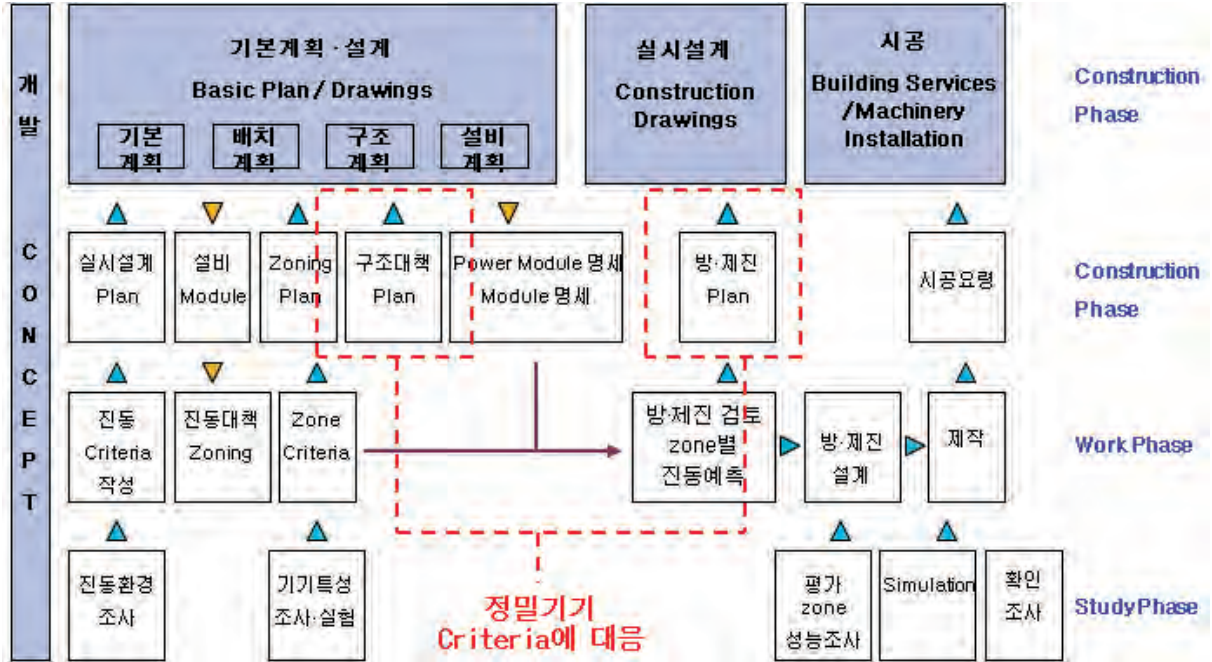
세 번째는 정밀장비와 같은 레벨, 같은 zone에 설치되는 생산장비들이다. 공조설비, 냉동기, 냉각기들처럼 발생진동이 크지는 않지만 정밀장비 인근에 위치하므로 큰 영향을 미치는 경우가 있으며 가진설비들처럼 장비제원을 가지고 동하중을 산정할 수 없으므로 더 복잡한 문제이고 더욱이 설계단계에서는 알 수 없다는 것이다. 그러므로 진동설계를 하는 엔지니어는 시설의 종류별로 생산장비로부터 발생하는 진동량이 어느 정도의 수준이 된다고 하는 것을 경험적으로 알고 있어야 하며 문제가 되는 경우는 방진을 하여 생산장비로부터 전달되는 진동을 감소시켜야 한다.

네 번째는 클린룸 내부에서 이루어지는 인간의 활동으로 순수한 보행이나 작업대차의 이동 등이다. 일반건물에서도 장스팬 철골구조의 경우에는 보행진동이 체감수준에 이르는 경우가 있으나 강성이 큰 클린룸 구조에서는 체감수준에 이르는 경우는 없다. 그러나 미진동수준이 요구되는 경우에는 다를 수 있다. 예를 들어 1 $\mu$ m의 진폭진동은 인간이 체감할 수 없으나, 반도체 생산에서 노광장비(stepper)가 1 $\mu$ m보다 훨씬 작은 선폭의 패턴을 웨이퍼 위에 주사하는 경우 1 $\mu$ m의 진폭진동은 수율에 큰 영향을 미치는 진동이 될 수 있다. 인간의 보행 등 행위는 정밀장비 바로 옆에서 이루어지는 경우가 있게 되므로 중요한 진동원이 되는 경우가 있고 진동설계자는 이와 같은 진동원에 대한 분석을 하여야 한다. 진동원이 어렵다는 것의 초점은 불확실성이 너무 크다는 것이다. 예를 들어 책상위에서 선풍기가 돌고 있다고 하자. 선풍기의 회전수, 중량, 날개의 중량을 안다고 하더라도 결과 선풍기가 책상에 가하고 있는 정확한 동하중(크기 및 진동수대역)은 알 수 없다. 더 간단한 경우로서 중량을 알고 있는 구형의 철물을 바닥에 떨어뜨리는 경우 발생한 에너지의 총량은 간단히 계산할 수 있으나 바닥에 가해진 동하중의 특성은 매질에 따라 달라지는 것이므로 알 수 없다. 선풍기의 바닥에 동하중을 측정할 수 있는 하중센서(force sensor)를 여러개 달아서 측정하면 가능할 수도 있다. 그러나 크기가 큰 많은 설비들에 대하여 이러한 방식으로 동하중을 알아낸다는 것은 불가능하며 설계단계에서 설비들은 아직 실체가 존재하지도 않는다.

미진동의 문제뿐만 아니라 모든 동적인 문제에서 동하중의 불확실성은 가장 큰 문제이며 어려운 부분이다. 동적 해석이라는 것은 정적해석에 비하여 오류가 개입될 소지나 과감한 가정이 너무나 많기 때문에 동하중이 있어도 정확하게 해석할 수 없는데 하중도 없는 상태에서 해석을 하는 것이 된다.

#### 4. 방 · 제진

방진은 진동원으로부터 발생하는 진동이 바닥에 전달되지 않도록 차단하는 것을 말하며 제진은 바닥의 진동이 정밀장비에 전달되지 않도록 차단하는 것이다. 즉 동일한 장치를 가진력이 큰 공조설비의 바닥에 부착하면 방진장치가 되는 것이고 정밀장비의 바닥에 부착하면 제진장치가 되는 것이다. 미진동시설에서 방 · 제진장치는 반드시라고 해도 좋을 만큼 필수적인 것이다. 예를 들어 어떤 시설에 정밀장비가 단 한 개가 설치된다고 가정하면 전체 바닥은 많은 돈을 들여서 정밀장비의 진동수준에 맞출 필요없이 바닥의 진동수준은 그보다 낮은 어떤 수준으로 맞추어 놓고 정밀장비에 고가의 제진장치를 채택하여 진동수준을 맞추는 것이 더 경제적인 가능성이 있다. 물론 어떤 시설에 정밀장비가 단 한



[그림 4] 미진동설계 프로세스

개만 배치되는 경우는 없겠지만 바닥의 진동수준과 방·제진장치에 요구되는 정도를 조절하는 것은 진동설계에서 매우 중요한 부분이다.

〈그림 4〉에는 미진동설계의 일반적인 프로세스를 나타내었다. 이 두가지는 또한 강하게 결합된 문제인데 그 이유는 방·제진장치의 진동효율은 자체의 성능으로 결정되는 것이 아니라 바닥의 진동특성과 결부되어 결정되므로 상호작용(interaction)의 문제가 된다는 것이다. 방·제진장치를 납품하는 제조업체에서는 장치의 효율이 몇 퍼센트라고 매우 높은 값을 제시하는 경우가 있는데 이러한 계산근거는 장치가 설치되는 바닥의 강성이 무한대라고 가정한 것이다. 그러나 바닥구조가 강성이 낮을수록 방·제진장치의 효율은 떨어지게 된다. 예를 들어 방진장치로 사용한 스프링은 고유진동수가 5Hz인데 바닥슬래브의 1차고유진동수가 6Hz라면 방진의 효율성은 아주 낮은 값이 될 것이다.

방·제진은 flexible방식과 stiff방식이 있다. Flexible방식은 유연한 재료를 설비나 장비 하부에 설치하여 고진동수 대역의 진동을 걸러주는 것으로 일종의 low pass filter를 기기 하부에 설치하는 것이다.

예를 들어 일반적으로 클린룸에서 가장 큰 부하를 갖는 설비는 공조기인데 공조기의 회전수가 1800rpm이라면 진동수로는 30Hz이므로 30Hz나 그 배수(60Hz, 90Hz)의 진동성분이 주 가진대역이 될 가능성이 크다. 그러므로 공조기 하부에 고유진동수가 5Hz인 스프링을 설치한다면 30Hz진동수의 진동은 대부분 걸러질 수 있다. 제진에 대해서도 flexible방식의 원리는 방진과 같다.

Flexible방식의 방·제진에 이용되는 재료 또는 장치로는 금속스프링, 공기스프링, 방진고무, 고무패드 등이 있다. 방·제진장치는 low pass filter이므로 기본적으로는 재료의 고유진동수를 어느 정도로 낮출 수 있는가 하는 것이 관건이다. 물렁하게 하면 할수록 즉 강성을 낮출수록 좋을 것이라고 생각할 수 있으나 스프링작용을 하려고 장비하부에

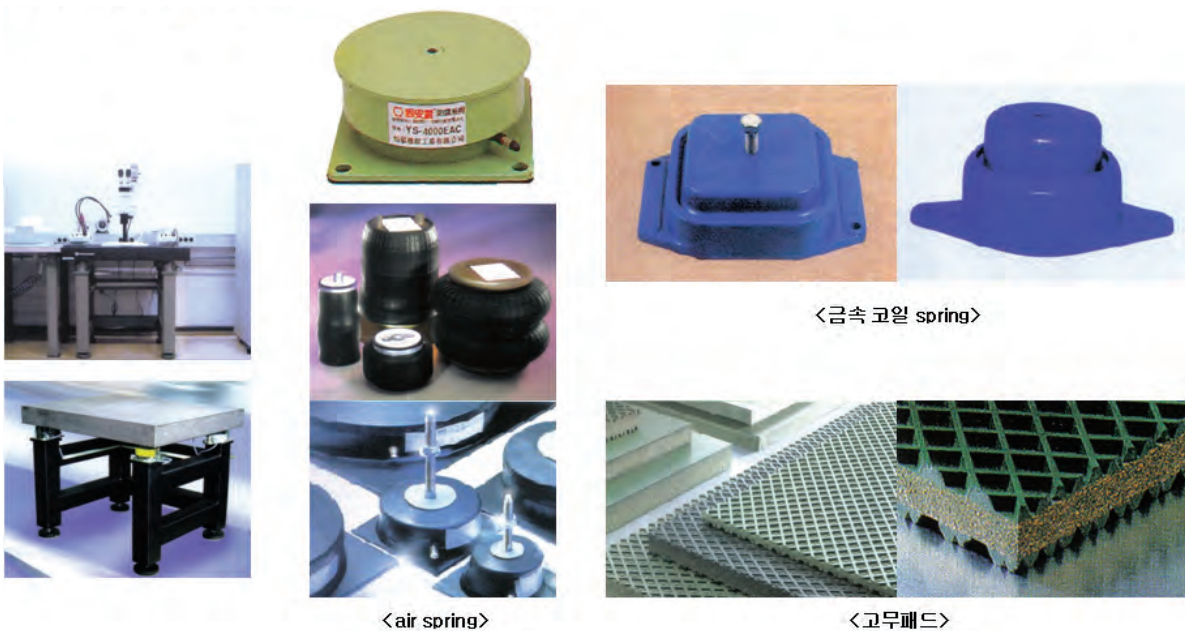


[표 1] 방·제진 재료의 종류 및 특성

구분	금속코일스프링	공기스프링	방진고무	고무패드
고유진동수(Hz)	2~10	1~5	7~20	15~
감쇠비율	0.005	0.1~0.2	0.05~0.1	0.05~0.1
고진동수 영역의 절연성능	△	○	○	○
가진력이 큰 기기에 대한 적용	○	◎	△	×
제품의 균일성	◎	○	△	○
수 명	◎	△	△	×
사용상 주의점	공진점 통과 시간이 긴 것은 댐퍼를 병용, 고무 등과 병용해서 고차의 개선을 도모	공기압을 보조하기 위해 유지관리 필요, 밀폐형에서는 낮은 진동수를 얻을 수 없음	온도의 영향이 크다. 제품의 편차가 크므로 여유 있는 설계 요함	방진에 대한 효과는 그다지 기대할 수 없으며 보조적인 사용이 바람직

◎ 매우 좋음 ○ 좋음 △ 보통 × 나쁨

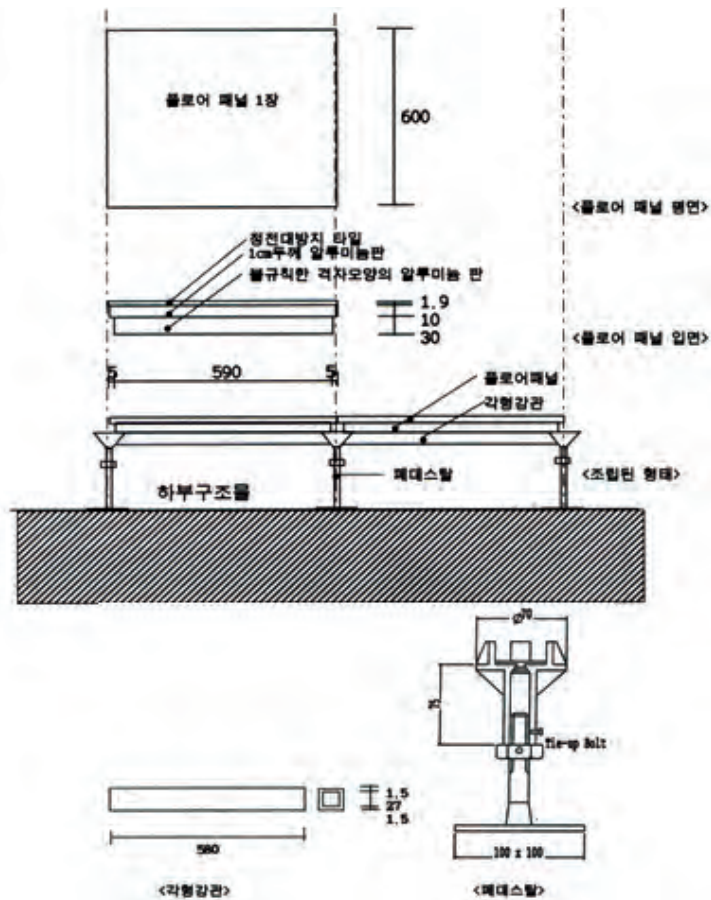
부착하였을 때 눌러져버려 장비작동 시 스프링작용을 못한다면 아무 효율이 없다. 그러므로 재료 자체의 물성으로 구현할 수 있는 고유진동수 대역이 대체적으로 결정된다. 공기스프링이 가장 저진동수로 만들어 낼 수 있으며 다른 재료에 비하여 가격면에서도 고가인 경우가 많다.



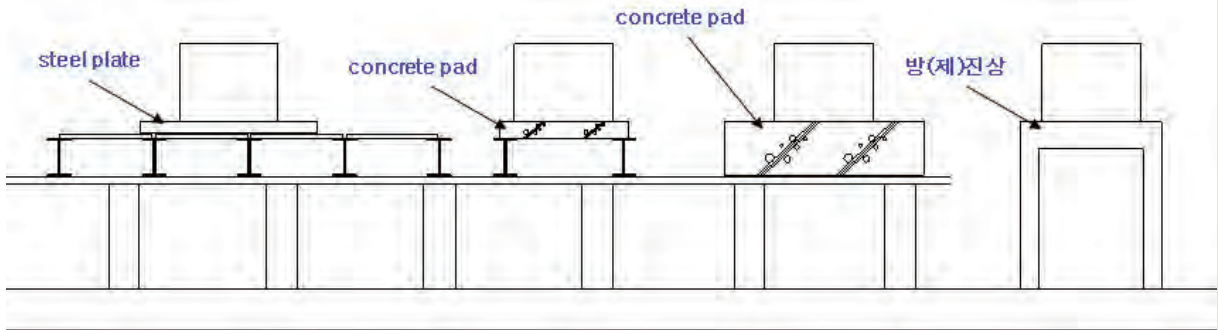
[그림 5] Flexible방식의 방·제진 재료 예

클린룸구조의 생산층에서 대부분의 장비들은 access floor 위에 설치된다. 설치되는 Access floor panel의 크기가 대부분 600×600mm이므로 철근콘크리트로 격자보를 만들 때 격자의 크기를 600×1200mm으로 하는 경우가 많으며, 철골구조로 하는 경우 작은보를 600mm간격으로 두고 그 위에 이중상(access floor)를 구성한다. Panel을 올려놓는 방식에는 격자보 위에 그대로 올려놓는 방식과 pedestal을 설치하고 그 위에 올려놓는 방식이 있다. 물론 일정 구간마다 구멍을 뚫어놓은 panel을 두고 공기가 순환할 수 있는 통로로 이용한다.

Access floor는 공조나 공간활용을 위한 것이며 진동을 고려한 시스템은 아니다. 당연히 Access floor상의 진동수준은 격자보 위에서 측정한 값보다 커지게 된다. 그러므로 정밀한 장비인 경우에는 access floor 위에 올려놓지 않고 격자보 위에 직접 올려놓는 방식을 취하는 경우가 많으며, 격자보 위와 access floor 위는 레벨차이가 있으므로 보정할 수 있는 별도의 바닥을 설치하여야 한다. 예를 들면 철근콘크리트 독립슬래브가 있는데 슬래브를 access floor시스템과 동일 높이로 만들어 격자보 위에 올려놓고 그 위에 정밀장비를 올려놓는 방식이다. 물론 이 경우에는 독립슬래브가 설치되는 부분에는 access floor를 오픈시킨다. 이 경우 독립슬래브는 stiff한 제진대라고 볼 수 있으며 정해진 용어나 정의는 없으나 access floor보다 강성이 큰 바닥을 별도로 만들어서 장비를 올려놓은 경우 이는 stiff한 제진방식이라고 보아야 한다.



[그림 6] Access floor 설치 예(Pedestal 방식)



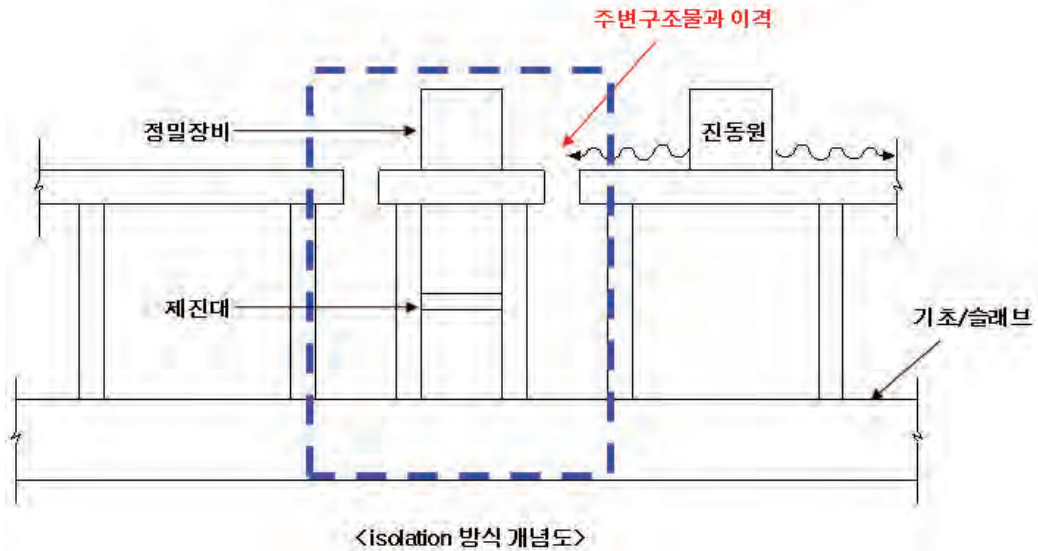
[그림 7] Stiff한 제진 구조 형상의 예

Access floor를 오픈시키지 않고 access floor 위에 독립슬래브를 올려놓고 장비를 올려놓는 방식도 있으나 이 경우에는 access floor보다 독립슬래브 상의 진동은 저감될 수 있으나 격자보 위에 직접 설치하는 것보다는 효율적이지 못하다. Access floor 위에 철근콘크리트 슬래브를 올려놓고 제진의 효과를 위해서는 200 mm 이상은 되어야 하므로 레벨이 해결되지 않는 경우에는 철근콘크리트 대신 두꺼운 강판을 사용하는 경우도 있다.

격자보 위에 concrete pad나 steel plate를 이용하여 stiff한 방식의 제진을 사용하는 경우 격자보 상부구조는 pad에 면하여 잘라내어 진동이 격자보를 통하여 전달되도록 약하게 격리(isolate)시키는 경우가 많다. 전자현미경 같이 작은 경량의 정밀장비는 table위에 올려놓은 채로 사용하는 경우가 많이 있다. 일반적으로 사무실에서 사용하는 table은 단단하게 보인다고 하더라도 진동을 증폭시키는 경우가 많이 있어서 제진목적으로 강성이 큰(필요에 따라서는 질량도 부과한다) table을 만들어서 사용하는 경우가 있는데 이것도 stiff한 제진방식의 일종이라고 볼 수 있다.

제진의 원래 정의는 바닥구조에서 전달되는 진동이 정밀장비로 전달되지 않도록 차단하는 것인데 flexible한 제진방

식은 재료의 성질에 따라 차단하는



[그림 8] Isolation방식의 제진구조 예



진동영역이 분명히 존재하게 되나 제진목적으로 사용하는 경우는 현실적인 큰 제약이 따른다. 그것은 정밀장비 하부에 혹은 정밀장비를 지지하는 table하부에 유연한 재료를 끼워넣는 경우 진동수가 큰 가속도는 대부분 저감시킬 수 있으나 저진동수에서 변위가 발생하게 되기 때문에 이를 수용할 수 있는 정밀장비에 사용이 제한된다는 것이다.

생산라인에서 정밀장비에 인접하여 가진력이 큰 장비가 배치되는 경우 정밀장비를 적극적인 Isolation 방식으로 제진시키는 경우가 있다. 즉 생산라인 층에서 격자보를 통째로 제진대와 이격시켜서 진동전달 경로는 변화시키는 것으로 경우에 따라서는 return plenum층까지 격리시켜서 두 개층 이상을 격리구조로 만들기도 한다. 생산라인에서 발생하는 진동성분들은 대부분이 수직방향 가진력이 더 크기 때문에 진동설계를 하는 입장에서는 수직방향의 진동기준을 만족시키기가 어려운 경우가 많다. 이와 같이 적극적인 격리구조를 채택하는 경우 수직방향 진동의 저감에 대해서는 효과적인 경우가 많지만 진동기준이 예를 들어 VC-D또는 VC-E정도의 등급으로 양방향에 대하여 주어졌다면 수평방향의 진동에 대하여 기준을 만족하는 것이 어려워지는 경우가 많다. 이것은 격리시킨 구조에 대하여 횡방향 강성을 충분히 보장하는 경우에도 높이가 높고 격리시킨 부분의 면적이 작을 경우 문제가 될 수 있으므로 채택하는데 주의를 요한다.

## 5. 맺음말

정밀산업에 있어서 미진동설계는 기술을 공개하지 않는 경우가 많으며, 설계과정에 포함되어 있는 과감한 가정이나 오류가능성을 생각하면 정적인 구조설계에 비하면 뒤떨어진 분야인 것은 분명합니다. 2회에 걸쳐서 본 회원칼럼에 기고한 내용도 대부분 관련문헌을 조합한다면 얻을 수 있는 것들이며, 설계과정에 대한 면밀한 기술은 전혀 되지 못하였는데 그럼에도 일반 회원들의 입장에서 진동은 생소한 경우가 많으며 특히 미진동분야는 더욱 그러할 것이라고 생각하여 업무에 대한 간략한 소개를 한다는 마음으로 기술하였습니다.