

클린룸과 미소진동(I)



조 동 진 총무수석
(주)세진구조이엔씨 대표이사

본 고에서는 클린룸과 미소진동이라는 주제로 일반사항과 설계경험을 정리하여 2회에 걸쳐 기술하고자 합니다.

세상의 모든 물체는 진동하고 있다. 대부분의 경우에는 진동을 느끼지 못하거나 장애가 되지 않으나 어떤 경우에는 문제가 된다. 건축구조와 관계되는 진동문제를 나열하면 대략 다음과 같을 것이다.

첫째, 구조진동이다. 지진이나 바람을 대상으로 하는 대규모 동하중으로 건물의 안전성에 관계되며 규준에서 하중 값이나 해석방법 등을 제시하고 있다. (구조진동이라는 말은 정식용어는 아니지만 다른 적당한 말이 나올 때 까지만 사용하기로 하였다.)

두 번째는 교통진동과 건설진동이다. 각기 교통수단으로부터 또는 건설현장에서 발생하는 진동으로 역시 건축물에 피해를 발생시킬 수 있으나 그것보다는 거주성에 장애가 되는 경우가 더 많은 것 같다. 건설진동에서 특별한 한가지가 있는데 발파진동이다. 발생진동량이 교통진동이나 일반 건설장비에 의한 것보다 파괴적인 경우가 많아서 거주성 차원을 넘어 인접건축물의 구조안전에도 영향을 미치는 경우가 많다. 가축에 피해를 주기도 하고 바로 그 현장의 콘크리트 양생에 영향을 미치기도 한다.

세 번째는 장비나 설비로 인한 진동이다. 주로 그런 것들이 많은 공장에서 문제가 되는 경우가 많은데 일반 건물에서도 문제가 될 수 있다. 예를 들면 호텔의 맨 꼭대기층은 보통 펜트하우스라고 해서 최고급실이 위치하는 경우가 많은데 옥상에 있는 냉각탑의 진동이나 소음이 전달되면 문제가 될 수도 있다. 규모가 큰 진동설비의 기초를 설계하는 문제로 '진동기초의 설계'는 아예 독립된 장르로 취급되기도 한다.

마지막으로 네 번째는 미소진동 또는 미진동(micro vibration)이라고 하는 것으로서 반도체생산과 같은 정밀시설에서 정밀생산장비 또는 측정장비의 작동성을 보장하기 위하여 장비가 설치되는 바닥의 진동수준을 요구되는 어떤 값 이하로 유지하는데 관련되는 것이다. 미진동제어가 요구되는 정밀시설의 경우 클린룸을 포함하는 경우가 많아 미진동 문제는 클린룸 구조와 연결되는 것이 보통이다.

1. 클린룸의 정의와 종류

일반적인 시각으로도 클린룸은 정밀시설이라는 인식이 있는 듯하다. 용어 자체가 클린룸이므로 클린룸이 갖추어야 할 첫 번째 조건은 분진이라고 생각해도 좋은데 사실 클린룸에 요구되는 가장 중요한 세가지 환경조건은 분진, 온도,

[표 1] 정밀환경대상분야와 환경요소

구 분	대 상 환 경 요 소					
	분진	세균	온도	습도	진동	소음
반도체 제작	◎		◎	◎	◎	
디스크 제작	○		○	○	◎	○
녹음 스테이지					○	◎
정밀기기부품	○		◎	◎	◎	
정밀인쇄	○		○	○	○	
병원		◎	○	○	○	○
방적			◎	◎	○	

○ : 크게 관련됨 ◎ : 약간 크게 관련됨

습도이다. 미국연방규격 No.2096의 정의로 클린룸은 “공기중의 미립자, 온도, 습도, 압력등을 제어할 수 있는 실”로 되어있다. 클린룸에 요구되는 환경조건은 실의 용도에 따라 다른데 대표적인 것은 <표 1>과 같다.

클린룸이라고 해도 수용되는 장비나 기기의 정밀도에 따라 요구되는 환경요소들의 수준도 매우 다르다. 종래부터 클래스(class)라고 부르는 것으로 미연방규격(구)의 정의에 따르면 1ft³의 용적당 존재하는 0.5 μ m이상 크기의 분진 입자수로 정의하고 있으며 클래스1~클래스100,000의 청정도가 정의되어 있다. 분진의 크기는 0.5 μ m이상이 아닌 0.1 μ m를 사용하기도 한다. ISO에서는 클린룸의 청정도를 다음과 같이 구분하고 있으며 JIS나 미연방규격은 순차적으로 ISO규격으로 정합되었다.

[표 2] ISO의 클린룸 청정도 구분(ISO 14644-1)

청정도 클래스	상한농도(개/m ³)는 아래에 나타내는 대상입경 이상의 입자농도를 나타낸다.					
	0.1 μ m	0.2 μ m	0.3 μ m	0.5 μ m	1.0 μ m	5.0 μ m
ISO 클래스1	10	2				
ISO 클래스2	100	24	10	4		
ISO 클래스3	1,000	237	102	35	8	
ISO 클래스4	10,000	2,370	1,020	352	83	
ISO 클래스5	100,000	23,700	10,200	3,520	832	29
ISO 클래스6	1,000,000	237,000	102,000	35,200	8,320	293
ISO 클래스7				352,000	83,200	2,930
ISO 클래스8				3,520,000	832,000	29,300
ISO 클래스9				35,200,000	8,320,000	293,000



〈표 2〉에 의하면 관용적인 표현으로 클린룸 클래스100은 ISO클린룸 클래스5에 해당하는 것을 알 수 있다. (3,520 개 /m³ = 100 개/ft³)

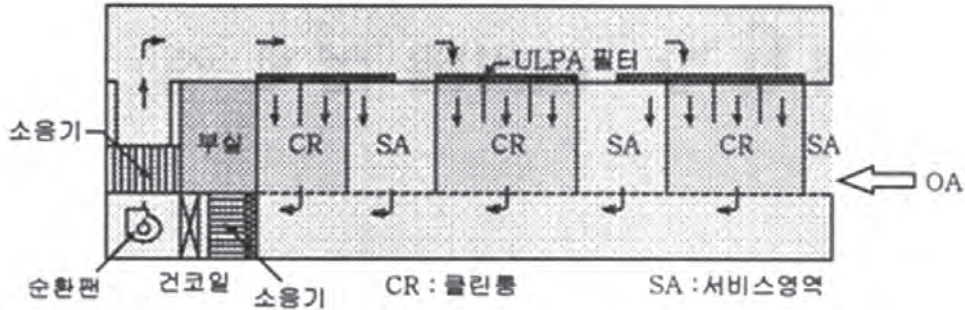
클린룸의 클래스가 높아질수록, 즉 클래스1으로 갈수록 엄격한 요구조건이 되는 것이므로 공기조화를 위한 설비의 부하가 커지게 되는데 일반적으로 다른 모든 요구조건도 따라서 엄격해지는 경향이 있다. 진동의 요구조건은 수용되는 개별 정밀기기나 장비에 따르게 되는데 클래스가 높은 클린룸(클래스1에 가까운)의 경우에는 진동에 대해서도 더 정밀한 장비에 연결되는 것이 당연한 것으로 볼 수 있다.

일반 시설에 비해서 분진이 없는 환경을 만들기 위하여 공조방식이 중요하다. 공기를 순환시키는 방식에는 수직으로 순환시키는 방식, 수평으로 순환시키는 방식, 일반적으로 수직으로 인입하고 수평으로 필터링하는 난류방식이 있으며 청정도에 대한 대응은 수직층류방식이 가장 높고 수평층류, 난류방식의 순이다.

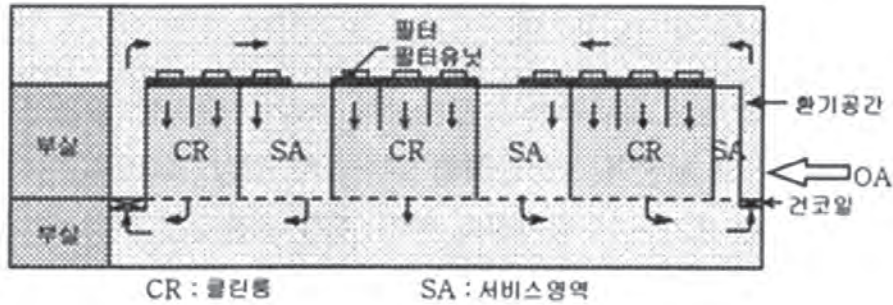
[표 3] 기류방식에 의한 클린룸의 분류

항목/방식	수직층류 방식 Vertical Laminar Airflow Clean Room	수평층류 방식 Horizontal Laminar Airflow Clean Room	난류 방식 Turbulent Airflow Clean Room
청 정 도	Class 1~100	Class 100	Class 1000~10000
작업 중 청정도	작업자로부터 영향은 적다.	상류발진이 하류에 영향을 끼친다.	작업자로부터 영향 있음
초기투자비용	상	중	하
운전비용	상	중	하
보 수	쉬움	어려움	쉬움
유지관리	쉬움	쉬움	쉬움
확 장 성	어려움	어려움	가능하다
정밀제어	실 전체 제어를 위해 실내의 불균형 약간 있음	상류발진이 하류에 영향을 끼친다.	불균형 있음

클린룸의 종류를 공조방식에 의해서 분류할 수도 있으며 가장 많은 예는 openbay 방식과 FFU 방식이다. Openbay 방식은 클린룸 하부에 설치한 대형 fan(일반적으로 axial fan이라고 한다)을 이용하여 기류를 순환시키는 방식으로 필터는 클린룸 천정 전체에 설치된다. 대형 fan으로 공조하므로 유지관리는 쉽지만 fan을 구동하는데 큰 부하가 요구되며 axial fan이 설치되는 부분에 큰 층고가 필요하다. FFU방식은 소형 fan과 필터가 일체로 된 unit(FFU, Fan Filter Unit)을 천정에 다수 부착하여 이로부터 공조 및 필터링을 하는 것이다. 순환공조를 위한 기계실이 필요치 않으므로 세계적으로 주류를 이루고 있는 방식으로 우리나라에서도 정밀 생산공장에서 근래에 시공되는 클린룸은 거의 FFU방식을 취하고 있다.



[그림 1] 오픈베이방식



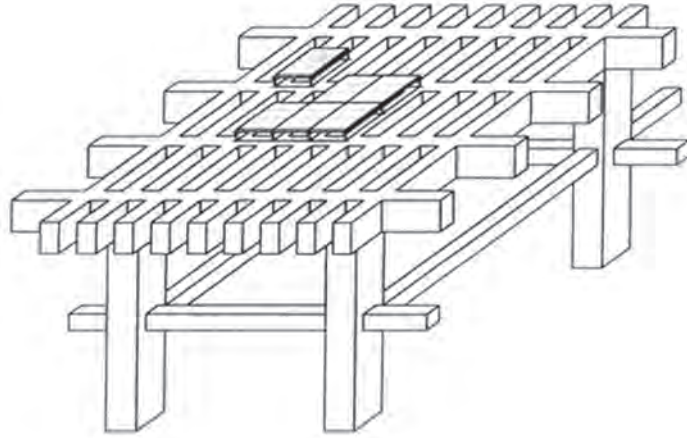
[그림 2] FFU방식

2. 클린룸의 구조방식

수직층류방식의 클린룸을 예로 들면 일반적인 공장구조와 비교하여 클린룸 구조의 가장 큰 특징은 첫째, 공기를 순환시키기 위해서, 즉 생산라인이 위치하는 층(이하 생산층) 천정에서 인입된 공기가 순환되기 위해서는 생산층 하부에 공기를 순환시키기 위한 공간이 필요하다. 이 층을 return plenum이라고 한다. 즉 생산을 위한 단위 unit은 두개층 구조가 된다. 두 번째는 생산층 바닥을 통하여 공기가 순환되어야 하므로 생산층 바닥은 격자보 구조로 하여 open된 바닥으로 만든다. 격자보 위에는 액세스플로어(access floor)를 깔아서 바닥을 구성하여 R/P의 바닥은 물론 일반건물 처럼 막힌 슬래브바닥으로 구성된다. 일반적으로 생산층바닥은 진동제어를 위해서 높은 강성이 필요하므로 생산층 바닥에 소기둥(small column)을 두어 R/P 바닥에서 지지하는 방식으로 하고 주기둥(main column)은 상대적으로 넓은 간격으로 구성하는 방식이 된다.

생산라인층 바닥과 R/P층 바닥을 어떤 구조로 하는가는 진동의 요구조건 및 이를 실현하는 방식과 직접적으로 관계 된다. 우리나라에서 반도체 생산시설의 초기 형식에서는 격자보와 소기둥을 모두 철근콘크리트로 현장제작하는 방식이 많았으며, 모식도는 <그림 3>과 같은 형태가 된다.

바닥구조에 어느 정도의 강성을 부여하면 얼마만큼의 진동환경이 구현되는지 초기에는 알 수가 없었기 때문에 지금과 비교하면 과설계된 면이 있었다. <그림 3>은 openbay 방식에서 격자보 상부에 액세스플로어가 놓이며, 하부에 보이는 기둥들은 생산층만을 지지하고 R/P층 바닥에서 지지되는 소기둥들이다. 특히 초기의 openbay 방식에서는 R/P층의 층고를 매우 높게 하여 소기둥의 중간에 기둥을 횡구속하는 보를 두는 설계도 있었다. 이때 소기둥의 간격은



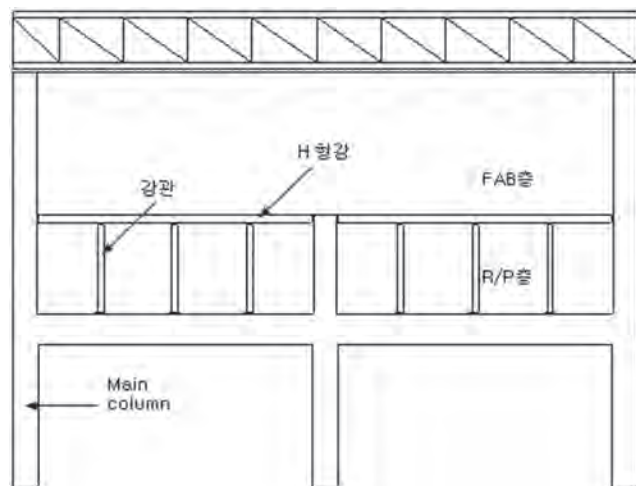
[그림 3] 클린룸 구조 모식도(오픈베이방식)

3~4m 정도로서 매우 좁은 간격으로 하였는데도 격자보의 굵은 1200mm가 되는 경우도 있었으니 일반적인 구조설계의 관점에서는 배근설계가 필요 없는 정도였다.

소기둥은 생산층 하부에만 구성되므로 설비를 배치하는데 거의 방해가 되지 않으나 주기둥은 생산층의 설비배치에 제약요소가 된다. 그래서 시간이 지날수록 주기둥의 간격을 넓게 하는 설계가 이루어졌다. 생산설비나 측정장비의 정밀도가 올라갈수록 스패를 크게 해달라는 요구가 이어졌으므로 이러한 요구를 수용하려고 노력하는 것은 당연한 것인데 장비의 정밀도와 비례해서 진동요구조건이 엄격해지게 되므로 진동설계자의 입장에서는 더 큰 스패를 갖는 구조물에서 더 엄격한 진동요구조건을 만족시켜야 하는 문제를 마주하게 되었다.

전자공장의 경우 생산제품의 집적도가 빠르게 증가하는 추세였으므로 공장도 빠르게 지어서 제품을 생산하는 것이 중요한 문제로 되었다.

반도체공장을 짓던 초기에는 철근콘크리트구조와 철골구조의 진동성능 차이도 지금보다는 잘 알지 못하였고, 강성과 감쇠값이 작은 철골구조를 미진동 요구조건을 갖는 정밀시설의 구조에는 채택하면 안 될 것이라는 생각이 있었던 것 같다. 그러나 미진동이라는 하지만 생산제품에 요구되는 진동요구조건은 장비의 수준에 따라 크게 다른 것이었고, 덜 엄격한 시설에 대하여 부분적으로 철골구조를 채택하였을 때 큰 문제가 없었기 때문에 그보다 상위의 시설에 대해서도 점차 채택되기 시작하였다. 실제로 생산층의 소기둥과 바닥구조를 철골구조로 하고 소기둥을 지지하는 R/P층 바닥보를 비롯한 주기둥은 철근콘크리트구조로 채택하는 경우는 많았는데 철근콘크리트 격자보가 생략되는 것만 해도



[그림 4] FFU시스템 클린룸 예

전체를 철근콘크리트로 하는 것보다 공기측면에서는 매우 유리한 것이었다.

〈그림 4〉에 생산층바닥을 철골구조로 하였을 때의 구조시스템에 대한 모식도를 나타내었다. 이와 같은 구조가 전체를 철근콘크리트구조로 한 것보다 진동성능이 떨어지는 것은 어쩔 수 없는데 뜻밖에도 그 차이가 크지 않았던 것은 소기둥의 간격을 줄이거나 생산층 바닥의 격자보의 크기를 키운다고 해서 생산층의 바닥강성이 비례해서 늘어나지 않는다는 것이다. 왜냐하면 소기둥을 지지하는 R/P층 바닥보의 크기를 아무리 키운다고 해도 결국 생산층 바닥의 소기둥이 기초에 직접 지지된 것과 같은 큰 강성을 부여할 수는 없기 때문에 R/P층 바닥에서 만들어지는 저진동수영역의 모드형상이 생산층 바닥의 진동성능에까지 영향을 미치지 때문이었다.

삼성건설에서는 한 개층 높이를 트러스로 하는 메가트러스공법을 정밀시설에 채택하여 장스팬 구조를 구현하려 설계한 적이 있었다. 당시에 메가트러스공법을 채택한 공장은 대단히 엄격한 수준의 진동요구조건을 적용하는 시설이었다고 들었는데, 이러한 진동조건하에서 메가트러스공법을 적용한 것은 결과와 관계없이 과감한 발상이었다고 생각한다. 또한 생산층의 격자보시스템을 현장타설하는 것은 여전히 어려운 일이었으므로 격자보를 PC화해서 적용한 예도 있었다.