

정밀 협진기기 방·제진을 위한 바닥 진동성능평가에 관한 연구

이호범*, 노병철**, 조동진***

Evaluation on the Floor Vibration Characteristics for the Vibration Control of Vibration Sensitive Equipments

Ho-Beom Lee*, Byeong-Cheol Lho**, Dong-Jin Cho***

ABSTRACT

In this paper we present an overview of the factors and techniques that must be considered in vibration measurements in the floor structures for microelectronics facilities. Normally narrowband vibration spectrum or equivalent signals are suggested as the guide indexes of site vibration phenomena. But it cannot support perfect informations in designing vibration control systems for the vibration sensitive equipment even though the spectrum serves to illustrate the fact that most real vibration environments are dominated by broadband energy as opposed to tonal energy. The major topics cover stiffness in frequency and time domain, acceleration level and modal characteristics from experimental modal analysis as well as narrowband spectrum. The combined signal analysis through the items mentioned above can give better solutions and would be positively recommended to solve the vibration problems on a sort of limited field.

1. 서언

현재 국내의 건축 구조물은 구조적 노후성, 기능적 부적합성 또는 경제적 목적에 따라 기존 구조물을 재활용하는 분위기가 고조되고 있으며, 이에 따라 renovation 실용화 범위가 점차 확대되고 있다. 이는 종종 플랜트 분야에서 발생하는 사안들에서 증거되고 있다.

이중 정밀 전자 공장은 내부 설비의 이동, 진동 제어가 요구되는 상부 중축 구조물의 설계, 기존 구조물에 새로운 협진(懸振)기기 설치 등에 따라 기기가 안치되는 바닥에서 진동 기초로서의 환경 적정성을 타진하기 위한 실무적 업무가 중요시 된다. 더우기 고집적 회로를 양산하는 반도체 공장과 같은 미진동 영역의 초정밀공장은 더욱 정밀한 진동 성능평가 과정을 통한 진단을 수행하므로써 이를 토대로한 lay out 계획 변경 또는 적극적인 진동제어 시스템의 채택을 적용하도록 하는 중요 기술의 한 영역을 차지하

* (주)ThreeTECH

** 상지대학교 토목공학과

*** (주)세진구조안전기술사사무소

고 있다.

본 실험적 연구의 첫번째 대상은 현재 사용되고 있는 사무실용 건물 2층에 정밀 협진 기기가 배치되면서 반도체 클린룸 구조에서 요구되는 미진동 수준까지 제어된 환경이 필요하게 되었다. 따라서 요구되는 정밀 설비의 바닥 기초 vibration design criteria 특성에 맞도록 진동 제어 시스템 대책안이 제시되어야 한다. 이를 위해 기존 클린룸 구조물과 정밀 장비가 배치될 신설 클린룸 구조물의 미진동 성능을 비교 평가하게 된다. 그 결과는 설계 기준치와의 비교와 계획된 장비 배치 lay out 및 클린룸 내외곽부에 설치될 제반 가진 설비 가동시 협진 지역에 대한 미진동 대책안 제시의 기초 자료가 된다. 두번째 대상은 정밀 전자 공장 2층 내에서 현 장비들을 동일 층에서 수평 이동할 때 이동할 장소의 바닥 진동 성능 효율성 확보 여부를 평가하는 것이다. 결과적으로 상기 두 가지 경우는 진동 제어 수준 정도에 대한 차이만 다를 뿐 이용되는 평가 방식은 동일하다.

대부분 지금까지 이러한 정밀 공장들의 진동 성능 평가 방식은 평균적으로 단순 자료에 의한 평가를 중심으로 하고 있었다. 이는 현장 설치 상황을 정확히 구명하기가 힘들고, 결과적으로 정밀 진단의 결과가 과다 또는 과소의 형태를 띄게 되므로 경제적 손실 또는 기술적 낙후성을 도래케 한다. 따라서 본 현장 실험적 성능평가 방식에서는 다양한 방식을 이용하여 현장 구조물에서 나타나는 진동 신호의 상호 평가에 따른 분석 과정을 제고하게 된다.

일반적으로 정밀 장비는 그림 1-1과 같이 바닥에서 요구되는 진동 specification이 제시된다. 바닥 진동 요구 기준은 각각의 장비 특성에 따라 진동수 영역에서의 가속도, 속도, 변위, PSD, dynamic stiffness, 진동 가속도 레벨 등을 들 수 있으며, 종종 시간 영역에서의 진동량 값을 요구하는 경우도 있다.

본 실험적 연구에서는 진동 기초로 선정된 대상에 대해 일정 가진력(F, force)을 위치별로 가진하고, 고정된 수진점에서의 변위(D, displace

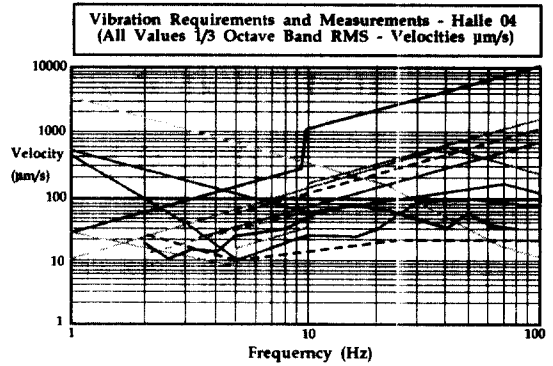


그림 1-1 협진 장비의 미진동 spec.

ment)를 측정하는 dynamic stiffness(F/D)를 산출하게 된다. 다음으로 진동 가속도, 진동 가속도 레벨, 진동 변위, 연속 충격 가진시 일정 거리에서의 동적 변위, 실험적 모드 해석 등을 장비 운행 중지시 실험 수행하고, 동일 위치에서 장비 가동시 진동 가속도, 진동 가속도 레벨, 진동 변위 등을 측정한다. 상기 test 및 현장 측정 결과는 시간 영역과 진동수 영역에서 목적별로 분석한다.

전달함수는 매체의 제반 구조적 특성(균열, 손상, 철근 강성 등)을 포함한 실 상상을 반영하고 있다고 할 수 있기 때문에 신뢰성을 확보할 수 있고, 다양한 현장 진동량 계측은 소수의 진동 측정 결과가 갖는 부정확한 진동 특성 구명을 명확히 할 수 있도록 한다. 현장 계측시 사용하는 진동 가속도 측정은 그 peak 값과 함께 탁월 진동수 성분 확인이 가능하다. 그러나 방·제진 시스템 구축을 위한 바닥 자체의 고유 진동수를 상기 측정 결과만으로 구명하기는 어렵다. 이는 대부분의 진동 측정 신호가 장비 가진 진동, 압진동 등이 포함되고, 가진 진동수가 구조물의 고유진동수 성분을 포함하고 있지 않을 때 그 양상을 나타내지 않기 때문이다.

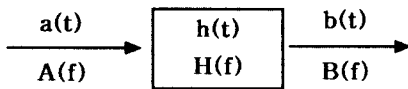
프로그램을 이용한 해석적 접근은 주로 보조적 방식으로 사용되나 구조 진동 특성 및 향후 예상되는 가진원에 대한 진동량 예측을 위해 중요한 방법이다. 따라서 상기 전달함수법에 의한 제반 test 자료와 현장 실측 진동 자료를 이용하여 그 성능을 입증하고 방·제진 시스템을 구성

할 수 있는 기반을 완성한 후, 해석적 접근을 이용하여 거시적으로 전달될 수 있는 진동량을 예측하므로써 진동 기초로서의 제반 능력을 검증하거나 적절한 제어 logic을 구축하게 된다.

2. 진동 성능 평가

2.1 전달함수를 이용한 System Analysis

전달함수를 이용한 방식은 현존 구조물의 구조적 impedance를 중요한 매개체로 선정하고 있다. 이는 입력함수로부터 출력함수를 이끌어내는 시스템 작용의 해석시 유용하며, 일반적으로 선형 시불변 함수에 의한 구조계(linear time invariant system)에 적용한다. 일정한 구조계는 자기 고유의 진동 전달체계를 갖는다. 이는 입력값과 출력값 사이의 시간영역 또는 진동수 영역에서의 정해진 관계를 갖게 하는 시스템의 특성이다. 그 알고리즘을 간단히 도시하면 그림 2-1과 같다.



<p>Time Domain : $b(t) = a(t) * h(t)$ [Convolution]</p> <p>Frequency Domain : $B(f) = A(f) \cdot H(f)$ [Multiply]</p>

그림 2-1 전달함수 체계

실험적으로 도출되는 전달함수는 진동수 영역에서 다루게 되며 신호의 입력과 출력의 물리량 종류에 따라 각각 대상 구조물에 대한 접근 방식을 다루게 하고 있다. 도출되는 전달함수는 각각 가진력과 관계되면서 의미를 달리하고 있으며 그 종류는 accelerance(A/F), mobility(V/F), compliance(D/F), dynamic stiffness(F/D), mechanical impedance(F/V), dynamic mass(F/A) 등이 있다. 여기서 F는 가진력 또는 입력 force를, A, V, D는 각각 가속도, 속도, 변위를

의미한다. 정밀 전자 공장과 같은 경우는 일반적으로 건축 구조물이 갖는 dynamic stiffness의 10배 정도의 크기를 갖고 있고, 이는 현장 실험적 계측에 의해 나타나는 결과를 의미한다.

Test는 선정된 grid 절점에 일괄적인 번호를 선정하고 중앙의 한 점을 fixed response 점으로 한다. 기 선정된 각 절점상을 대형 impulse hammer와 적절한 tip을 이용하여 가진한 다음 이를 1:1로 수신한다. Data acquisition system은 가능한 한 정밀 분석 장비를 이용하고 적절한 frequency span을 설정한다.

2.2 연속가진 진동변위 계측을 통한 성능 평가

내외란에 대한 바닥 진동 측정 평가는 설치 예정인 진동원에 의한 진동량을 직접적으로 제시하지는 못한다. 따라서 구조물상 임의의 가진점에서 impulse hammer에 의한 연속 가진과 일정 이격 거리상의 진동 변위를 측정하므로써 시간 영역에서의 stiffness를 산정할 수 있다. 이는 앞에서 산정된 dynamic stiffness와 비교될 수 있는 자료가 형성된다.

2.3 실험적 모드해석에 의한 성능 평가

구조체 진동 특성을 구명하기 위해 실험적 모드 해석을 수행한다. 이는 가진점과 수신점 간의 진동 신호를 이용하고 있고, 이러한 신호는 두 점간의 경로상 손상 또는 균열 등이 존재하더라도 매체 특성을 그대로 반영하고 있다. 따라서 수치 해석적으로 구명하기가 어려운 제반 error를 제거하게 된다. 사전에 계획된 1:1 FRF (frequency response function)는 충격 햄머에 의한 가진력에 대응되는 응답과의 비를 나타내므로 대상 구조물 고유 진동수 성분을 함유한 진동 신호를 보이게 된다. 따라서 이러한 고유 진동수를 대변하고 있는 계획된 절점들에서 진동 신호들을 상호 연계하도록 curve fitting 하므로써 바닥 고유의 진동 모드를 실험적으로 구하게 된다.

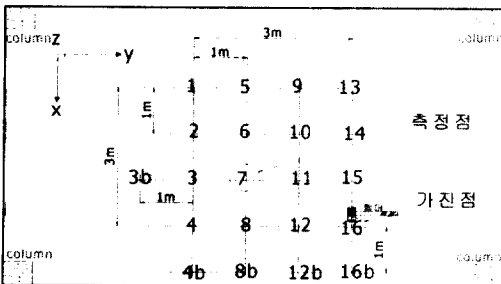
2.4 구조 진동 해석에 의한 성능 평가

구조 해석 프로그램을 이용하여 구조계 전체를 모델링하고, 현 상태에서 측정된 진동 측정 결과와 동일한 해석값이 나타나도록 가진력 및 모델링을 수정한다. 본 해석적 접근은 향후 설치되는 진동 가진 설비에 의해 어떠한 진동이 유발되는가를 예측하기 위함이다. 단 이러한 해석적 방식은 정확한 진동 응답을 구할 수는 없다. 이는 다양한 가진원들이 존재하고, 따라서 가진 위상을 논할 수가 없으며, 모달 댐핑, 배수 진동수, 고진동수 기여 등을 모델링화하기가 어렵고, 특히 국부 강성(local stiffness)의 차이에 모델링 detail 구성이 거의 불가능하며, 총체적으로 이들을 고려할 수 있는 프로그램의 능력에도 한계가 있기 때문이다. 따라서 가장 큰 진동 응답을 갖도록 하는 engineering value를 구명하는데 큰 의의를 갖는다고 할 수 있다.

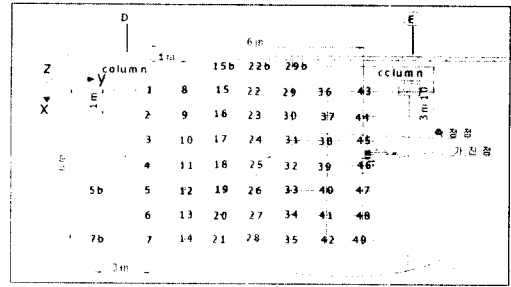
3. 결과 및 고찰

3.1 Dynamic Stiffness

첫번째 대상 구조물에 있어서 기존 구조물 및 대상 구조물에서의 현장 test 계획은 그림 3-1 (a) 및 (b)와 같이 각각 총 17개 points에 관한 test 자료를 구하였다. 두 구조물 계획 points들이 정확히 동일한 위치를 나타내지는 않으나 상대적인 결과를 최대한 비교할 수 있도록 영역을 설정하였다. 그림 3-2 (a)와 (b)는 test 결과를 각각 통합하여 도표화 한 결과를 보여주고 있다.

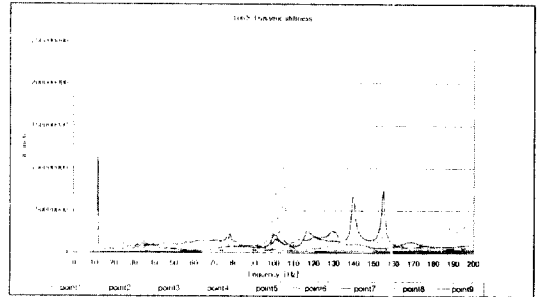


(a) 기존 클린룸에서의 test points

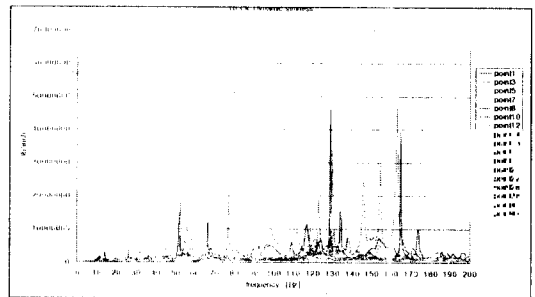


(b) 신설 클린룸에서의 test points

그림 3-1 첫번째 대상 구조물의 test points



(a) 기존 클린룸에서의 Dynamic Stiffness



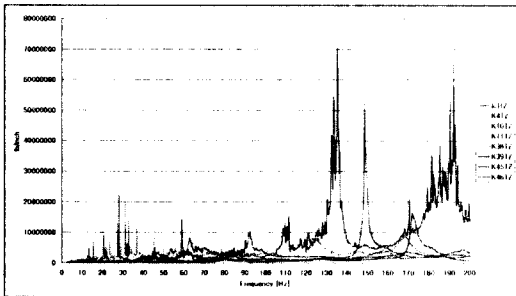
(b) 신설 클린룸에서의 Dynamic Stiffness

그림 3-2 첫번째 대상 구조물 Test 결과

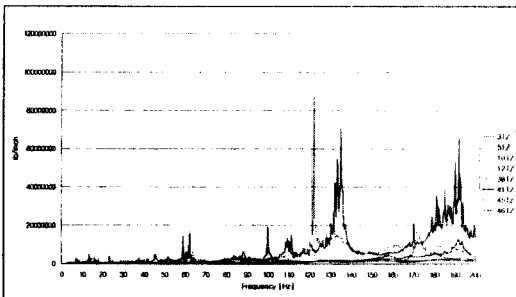
신설 클린룸 바닥의 dynamic stiffness는 기존 클린룸에 비해 매우 낮은 값을 갖는다. 12Hz ~13Hz에 영역에서는 어느 정도 탁월성을 보이고 있으나 정량적으로는 $1 \times 10^6 \sim 2 \times 10^6$ lbf/inch의 크기를 가질 뿐이다. 이를 제외한 25Hz 이하 진동수 성분들에 대해서는 거의 1×10^5 lbf/inch 정도의 크기를 갖는다. 이를 진동수 영역별로 구분하여 기존 클린룸과 비교하면 5Hz~10Hz 영역에서는 1/10 수준, 10Hz~25 Hz 영역에서는 거

의 1/200 수준 정도로 취약한 특성을 나타내고 있다. 25Hz 이상의 영역에 대해서 신설 클린룸의 경우는 약 $2 \times 10^6 \sim 3 \times 10^6$ lbf/inch의 크기를 갖고 있고, 기존 클린룸에서는 약 $1 \times 10^7 \sim 2 \times 10^7$ lbf/inch의 크기를 나타내고 있음으로 신설 클린룸이 기존 클린룸에 비해 1/5~1/7 정도의 수준에 있다. 특히 25Hz 이하 성분에 대한 결과값을 절대적 비교치로서 제시되고 있는 정밀 공장 dynamic stiffness, 2×10^6 lbf/inch과 비교해서는 약 1/20 수준에 있다. 결과적으로 신설 클린룸은 전반적인 강성 보강을 우선적으로 수행하여야 하며 특히 취약한 진동 특성을 보이고 있는 영역에 대해서는 최대한의 구조 보강 후, 그 특성에 대한 변화를 예측하고, 현장에서 가동중인 가진원에 의한 진동 응답치 및 프로그램 해석에 의해 복합적으로 협진 기기 제진 시스템을 구성하게 된다.

두번째 대상 구조물은 동일층 내의 다른 지역에 대한 test로 그 결과는 그림 3-3의 (a)와 (b)와 같다.



(a) 현위치에서의 Dynamic Stiffness



(b) 이동될 위치에서의 Dynamic Stiffness

그림 3-3 두번째 대상 구조물 Test 결과

생산 장비가 이동될 위치 바닥과 현위치에서의 dynamic stiffness는 매우 유사한 특성을 보이고 있다. 현 위치에서는 D.C.~36Hz 범위에서 약 6.0×10^5 lbf/inch 정도의 크기를 갖고 있고, 36Hz~56Hz 범위에서는 1.25×10^6 lbf/inch, 56Hz~80Hz 범위에서는 2.50×10^6 lbf/inch의 크기를 나타내고 있다. 그러나 그 이상의 범위에서는 매우 큰 값을 갖는다. 또한 이동될 위치에서는 D.C.~30Hz 범위에서 약 6.0×10^5 lbf/inch의 크기를, 30Hz~80Hz 범위에서는 1.25×10^6 lbf/inch, 80Hz 이상의 범위에서는 2.50×10^6 lbf/inch 이상의 크기를 보여 주고 있다. 특히 12Hz 및 22Hz의 경우는 양쪽 모두 특이한 크기를 갖고 있다. 결과적으로 낮은 진동수 범위(약 60Hz 이내)에서는 두 지역의 진동 특성이 매우 유사한 성질을 나타내고 있고, 이러한 결과는 대상 구조체들이 거의 동일한 구조 형식을 갖고 있음으로 기인되는 것으로 이미 예상된 결과이다. 이와 같이 본 실험적 접근은 바닥 진동 특성을 좀더 명확히 구명할 수 있음을 증명하였고, 현 위치에서 수율에 문제가 없다는 기준값이 존재하므로 본 평가에 따라 장비의 수평 이동에는 큰 문제가 없음을 확인하였다. 단 저진동수 영역에서 정밀 공장 절대 수준을 확보하고 있지 않기 때문에, 보다 안정적인 상태를 확보하려면 30Hz 이내의 진동 특성을 좀더 고진동수 특성을 갖도록 보강하여 강성 구조 시스템화 되게 한다.

3.2 연속진동 변위에 의한 시간영역에서의 D.S.

다음으로 연속 진동 변위를 이용한 방식에서의 결과는 표 3-1과 표 3-2와 같다.

표 3-1 기존 클린룸 Dynamic Stiffness(시간 영역)

가진점 번호	가진점-수진점(7면) 간의 직선거리	가진력의 크기 (lbf)	P-P 동적변위 (inch)	Stiffness (lbf/inch)
1	2.23	1480	2.96E-05	5.01E07
5	2.00	1210	4.57E-05	2.65E07
9	2.23	1504	4.96E-05	3.03E07
13	2.82	1177	4.13E-05	2.85E07

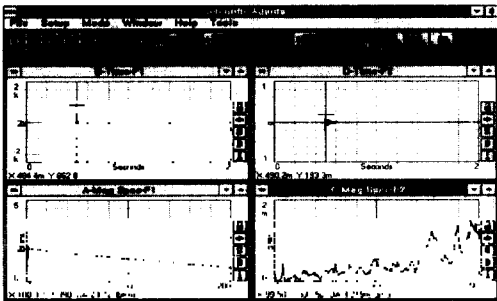
표 3-2 신설 클린룸 Dynamic Stiffness(시간 영역)

가진점 번호	가진점-수진점(25번) 간의 직선거리	가진력의 크기 (lbf)	P-P 동적변위 (inch)	Stiffness (lb/inch)
38	2.23	1214	6.60E-04	1.84E06
39	2.0	985	5.56E-04	1.17E06
41	2.8	1194	9.14E-04	1.31E06

상기 표에서와 같이 시간 영역에서 유사 이격 거리에 대한 결과는 진동수 영역의 25Hz 이상 성분에서의 결과값과 유사한 경향을 보인다. 이는 낮은 진동수 범위에 대해서는 신뢰성 있는 값을 주지는 못하고 있음으로 신속한 구조 성능 평가시 이용될 수 있는 방식으로 평가된다.

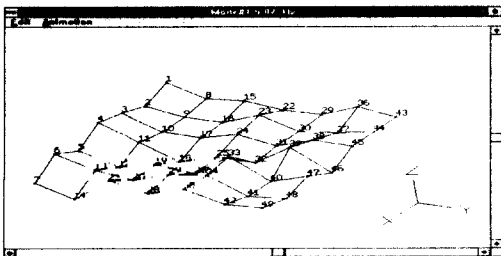
3.3 바닥 진동 특성의 다각도 평가

다음으로 동일 측정점을 기준으로한 충격 가진시 진동 가속도, 실험적 모드해석 및 내부 가진원에 대한 응답 결과 간의 연관성을 모색한다. 그 각각에 대한 결과는 그림 3-4, 그림 3-5, 그림 3-6을 통해 각각 설명된다.



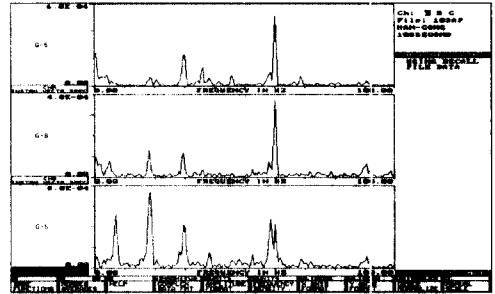
진동가속도 (G)	응답 진동 가속도 (진동수영역)	
	진동수 (Hz)	크기 (μ Grms)
193.3m	7/19/28.5/58.5/72.5	547.7/148.9/314.8/447.6/531.5

그림 3-4 신설 클린룸 진동 가속도 측정 결과



관련 모드(mode)	고유진동수(Hz)
1	5.87
2	8.23
3	12.07
4	16.77
5	19.59
8	25.66
9	48.70

그림 3-5 신설 클린룸 실험적 모드 해석 결과



방향	공조기 가동시 (응답 25pcint)		
	시간영역(G)	진동수(Hz)	가속도 값(μ Grms)
Z	3.7E-03	0.5/7/18.5/29.5/38/52.5/58.5/60	110/530/740/410/740/130/470/420

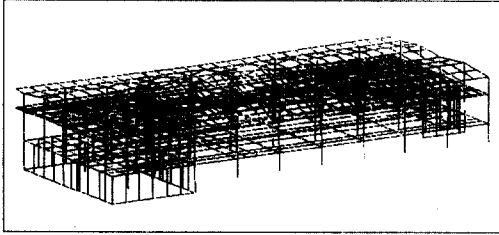
그림 3-6 신설 클린룸 내부 진동원에 대한 응답

이상과 같이 동일한 위치에서의 각각의 특색에 맞는 진동 특성을 설명하고 있다. 여기서 이러한 제반 자료를 복합화하여 최종적으로 5.87 Hz~8.23Hz (\approx 7Hz), 18.5Hz~19.5Hz (\approx 19Hz), 25.66Hz~29.5Hz (\approx 28.5Hz), 38Hz, 48.7Hz, 58.5Hz 등이 바닥 고유진동수 범위에 있다고 판정할 수 있고 따라서 어느 한가지를 이용한 평가 방식은 매우 부정확한 결과를 양산케 됨을 증명하고 있다.

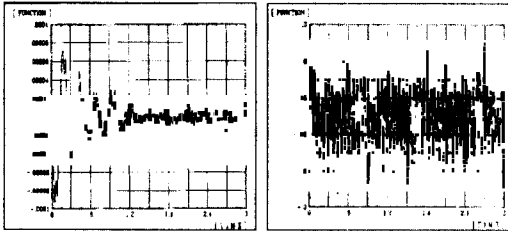
이러한 바닥 진동 특성은 정밀 설비에 대한 제진 시스템과 인접된 타 장비가 발생시키는 진동을 사전에 차단하기 위한 방진 시스템 구축시 중요한 역할을 하게 되며 앞에서 설명된 dynamic stiffness에 의한 진동수 영역에서의 구조적 특성을 함께 고려하므로써 transmissibility 공진 위치를 기준으로 좌·우측 구간의 기본적인 진동 제어 방식인 stiffness 조절 영역, 댐핑 조절 영역, mass 조절 영역을 효율적이면서 보다 정확히 활용할 수 있게 된다.

3.4 구조해석 프로그램을 이용한 진동예측 평가

프로그램을 이용한 구조 진동 해석은 현장 진동 측정 자료를 기준으로한 해석 모델링 타당성 입증 및 기대되는 목표 위치에서의 진동량 결과에 따라 구조 변화 방식을 결정할 수 있기 때문에 매우 의미 있는 분석 방법으로 평가된다.



(a) 모델링 타당성 입증후 mode shape 확인



(b) 설정 위치에서의 진동 변위 및 가속도
그림 3-7 신설 클린룸 구조 진동 해석 결과

기존구조와 최대 보강구조계의 수직고유진동수, target 위치에서 진동변위 및 가속도 변화를 유도하였고 그 결과는 각각 3%↑, 5%↓, 2%↓으로 나타났다. 이는 설비 방·제진 이전의 구조 진동학적 최적 상태를 유지시키기 위한 것이다. 단 향후의 고차원적 기술은 wave propagation 해석 기법을 통한 표면파의 근본 파악에 있고, 이를 이용한 예측 해석의 단계이다.

4. 결론

이상과 같이 정밀 혐진 기기 또는 그에 상응하는 설비의 진동 제어를 위한 바닥 진동 성능

평가 방식에 관한 논의에 대해 다음과 같이 정리할 수 있다.

1) 종종 단순한 방식만을 갖고 현장을 진단하는 과정은 과오를 양산할 수 있음을 재확인하였다. 따라서 향후 좀더 다양한 방식의 진단법을 구체화시켜 평가 방식의 질적 확대를 갖도록 한다.

2) 현장 조사 방식은 적어도 앞에서 제시한 방식들을 혼용하여 최적의 바닥 진동 특성을 구명하는 것을 제안하며 특히 적절한 전달 함수를 이용한 방식은 현장에 대한 많은 정보를 얻을 수 있기 때문에 적극적인 활용이 있어야 한다.

3) 프로그램을 이용한 구조 진동 해석은 구조 형식 보완과 응답 예측에 중요한 역할을 한다. 단 구조계 모델링 타당성 입증시 이용되는 현장 진동 실측 자료는 예측되는 결과에 많은 차이를 갖게 하므로 보다 정확한 측정과 분석으로 해석의 신뢰성을 확보할 수 있다.

참고문헌

- (1) D. J. Ewins, Modal Testing : Theory and Practice, John Wiley & Sons Inc., 1984
- (2) Colin G. Gordon, The Design of Low Vibration Buildings for Microelectronics and Other Occupancies
- (3) 하영호 & 김수중, 디지털 신호해석, 홍릉과학출판사, 1990
- (4) 이호범 & 조동진, 정밀 공장 라인 변경에 의한 2층 슬래브 진동 성능 평가 및 대책 보고서, 2000
- (5) 이호범 & 노병철, 2층 슬래브 내의 혐진 장비 수평이동에 의한 진동기초 성능 평가 및 대책 보고서, 1999