

실험적 모드해석법에 의한 이중바닥구조의 동특성 해석

Experimental Modal Analysis of Double Floor

변근주*, 노병철**, 이헌주***, 이호범****
Byun, Keun-Joo, Lho, Byeong-Cheol, Lee, Heon-Joo, Lee, Ho-Beom

ABSTRACT

When constructing highly precise production plants, for example, super LSI plants or semiconductor plants, it is important to take the necessary control countermeasures into consideration to obtain the working microvibration environment, which is directly related to product precision. Working environment of a clean room means vibration-free and there are only ultra-micro vibrations which human cannot sense. In order to provide a place having a vibration-free working environment with only ultra-micro vibration it is necessary to possess a great number of vibration isolation technologies, wide-ranging and abundant survey and test data, and a high level of knowledge enabling comprehensive judgments to be made. In this study, experimental modal analysis is used to analyze the dynamic characteristics of double floor for vibration-proofing near apparatus which generate vibration. It is concluded that the double floor system with rubber pad inserted between floor panel and pedestal is good for vibration proof.

1. 서론

급속한 산업발전에 따라 구조물은 거대화 또는 장대화 되거나 특별한 기능을 요구하게 되어 구조물에는 기존의 내하력이외에도 구조물의 사용성에 대한 엄밀한 설계기준이 요구되고 있으며, 고품질의 건설재료 개발과 구조물의 설계해석 및 시공기술의 향상 그리고 고정밀계측기 및 고성능컴퓨터의 개발에 힘입어 인간이 느낄 수 없는 범위 이하의 진동범위까지를 설계조건으로 요구하고 있는 실정이다.

진동은 지진진동, 미진동등으로 대별할 수 있으며, 미진동수준은 사람의 감각특성을 고려한 60 dB 진동수준 보다 작은 범위의 진동수준을 의미한다. 특히 반도체, 광학기기 및 고정밀기기 제조에 사용되는 제조설비, 측정기기 및 검사장비등을 설치하기 위한 공장의 건물구조, 원자력발전소의 격납구조 유전공학연구실등에서는 구조물의 안전성 이외에도 사용하중에서의 처짐, 속도, 및 가속도등의 동적응답정도를 일반구조물에 비하여 대단히 세밀한 미진수준까지 제한하고 있

으며, 실제로 고정밀화 설비의 가동부분에 의한 진동과 장비나 설비를 지지하고 있는 구조물을 통하여 전달되는 외부진동에 민감하게 반응하여 장비의 성능발휘 또는 생산수율측면에서 많은 문제를 야기하고 있는 실정이다. 통상 고정밀화 장비 자체의 진동은 개발회사에서 개선해야할 문제이나, 정밀장비의 외부진동환경에 대한 문제는 구조전문가가 개선해야 할 문제이다.

2. 연구목적

현재까지 일정수준이하로의 진동제어는 고정밀화장비가 설치되는 위치의 조정이나 방진기구설치 정도로 가능하였으나, 보다 고정밀의 장비에 대해서는 위의 소극적인 방안으로는 해결이 불가능하므로 외부진동원에 대한 평가로부터 장비, 설비에 대한 진동원 대책이 필요하다. 특히 청정실내에는 진동을 유발하는 장비와 협진장비가 공존하므로 이중바닥구조등을 이용하여 분리설치하거나 계의 동특성을 변화시키는 것과 같은 적극적인 방안의 모색이 필요하다.

구조물의 진동해석은 유한요소법이나 실험적 모드해석등 다양한 방법을 이용하여 수행되어 왔으며, 엄격한 설계요구 조건에 맞는 대단히 작은 허용진동범위 이내로의 진동제어는 기존의 시간영역에서의 해석만으로는

* 정회원 연세 대학교 토목공학과 교수

** 정회원 연세 대학교 토목공학과 박사과정

*** 정회원 연세 대학교 토목공학과 석사과정

**** 정회원 삼성건설 기술연구소 선임연구원

용이하지 않다. 특히 진동의 미소화나 진동원의 다양화로 인하여 결정적으로 작용하는 진동수 성분을 찾기 어려운 점, 진동전달경로의 복잡화로 까다로운 경계조건 등에 의하여 예측오차가 발생하는 점들을 고려할 때 시간영역에서의 해석 이외에 진동수영역에서의 해석을 실시하는 것이 바람직하다. 따라서 이중바다구조를 이용하여 보행자의 보행, 운반기기의 충격 및 진동유발기기 등에 의하여 발생하는 청정실 내부의 진동제어를 위하여 실험적 모드해석법을 이용하여 계의 진동수전달함수를 구하므로써 구조물의 미진동제어를 위한 동특성해석을 수행하는 것은 대단히 중요한 것으로 사료된다.

3. 허용진동범위 및 방진대책

3.1 허용진동범위

반도체공장내의 진동원으로는 냉동기, 에어컨, 변환기, 펌프, 엘리베이터 등이 있으며, 에어컨 덕트 또한 진동을 유발한다. 그림 1은 설비를 모아 놓은 철제프레임 구조물 하부에서 측정한 진동성분을 나타내며 표 1은 사람에게 의한 진동수를 나타낸 것으로서 다양한 진동수와 크기를 갖는 진동이 존재함을 나타내고 있다. 이러한 생산기계로는, 살포로(diffusion furnace)와 같은 로, 산알칼리 취급장비, 소형장비, 소형냉동기 및 여러종류의 펌프 및 압축기 등이 있으며, 소형 압축기는 청정실내에서도 볼 수 있다.

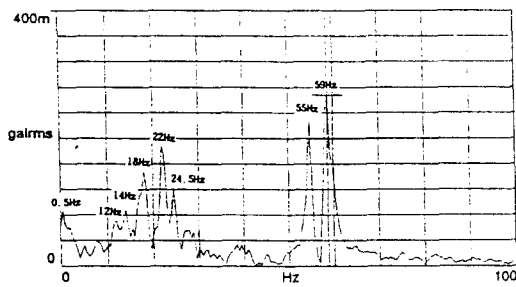


그림 1 생산장비의 진동측정 예
표 1 보행에 따른 진동수

| 보행방법 | 진동수(Hz) | 보폭(cm) |
|-------|---------|--------|
| 느린걸음 | ~ 1.7 | 60 |
| 보통걸음 | ~ 2.0 | 75 |
| 바른걸음 | ~ 2.3 | 100 |
| 천천히달림 | ~ 2.5 | 130 |
| 빨리달림 | ~ 3.2 | 175 |

오늘날 청정실내의 청정도의 중요성만큼 미진동 환경의 중요성도 강조되고 있으며, 이를 위한 진동제어과정은 현상에서는 충분히 만족스럽지 못하므로, 현재의 문제는 얼마만큼 낮은 수준까지 진동제어할 것인가이다. 일반적인 미진동 허용범위로는 변위의 경우 10Hz에서 1 μ m, 100Hz에서 0.1 μ m정도, 속도의 경우 60 μ m, 가속도의 경우 50dB (약0.3gal)정도의 가속도를 허용범위로 하고 있다.

만약 매우 작은 허용진동목표값이 미진동영역에서 설정된다면 막대한 공사비의 증가를 초래할 것이므로 방진설계에 대한 기본정책 수립시에는 방진하려는 장비의 허용진동수준을 확인하는 것이 가장 중요하다. 방진 건물설계의 선행조건인 진동허용 목표값은 협진기기가 놓이는 바닥슬래브의 진동허용값으로부터 환산하여 정량적으로 추정할 수 있다. 즉, 바닥슬래브의 진동허용값은 각 기계의 진동허용범위에 전달률의 역수를 곱하므로써 구할 수 있다.

그림 2는 정밀기기의 허용진동범위를 나타낸 것으로 진동허용값이 진동수 증가에 따라 변위의 경우 작아지나 가속도의 경우 커짐을 나타내고 있으며, 정밀기기의 특성에 따라 변위, 속도, 또는 가속도량으로서 범위를 결정할 수 있다.

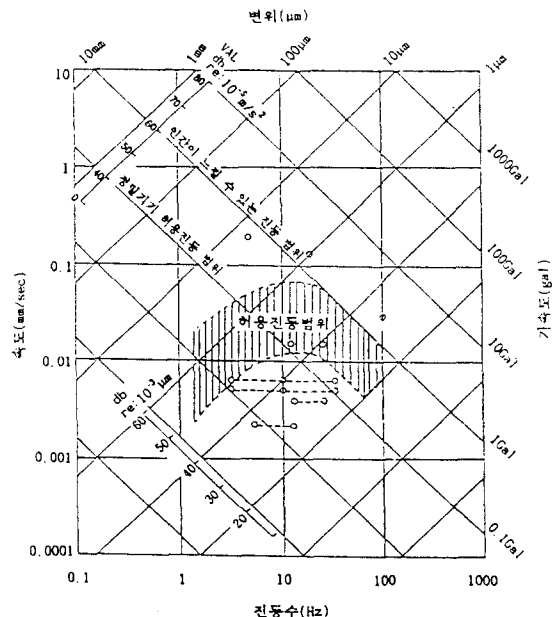


그림 2 정밀기기의 진동허용범위

3. 2 이중바닥구조에 의한 진동제어

청정실내부의 작업자는 저진동수인 수십Hz의 진동을 느끼며, 정밀현미경등을 이용할 경우 바닥의 흔들림현상을 경험하게 된다. 이러한 현상을 대부분의 진동을 일으키는 장비 근처에 방진설비가 된 장비가 공존하기 때문이다. 이러한 두종류의 장비가 동일한 바닥구조 위에 놓일 경우, 각기 진동을 유발한다. 따라서 이러한 장비에 대하여는 그림 3과 같은 이중바닥구조(double floor)로서 방진대책을 수립할 필요가 있다.

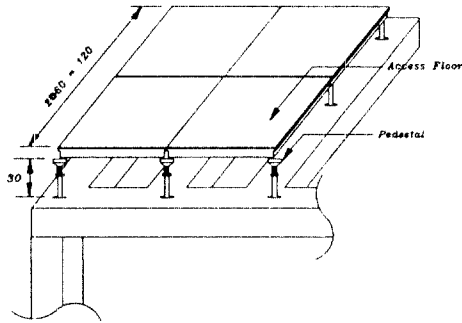


그림 3 이중바닥구조

이중상은 크게 두가지 구조형식으로 되어 있다. 하나는 free access만의 낮은 구조와 다른 하나는 철제 프레임 위에 설치한 높은 구조이다. 이중바닥구조의 진동은 과거의 측정자료를 근거로 하여 판단할 때, 격자보위의 진동보다 크다. 이러한 진동성질을 조사하기 위하여 충격망치(impulse hammer)로서 건물내 콘크리트 바닥슬래브에 충격량을 주므로써 수행한다. 만약 다양한 위치에 설치된 여러종류의 진동원에 의하여 발생한 진동이 이중바닥구조의 고유진동수범위내에 들게 되는 경우 방진대책이 필요하게 된다. 진동을 일으키는 설비의 환경조성에 있어서 방진대책으로는 건물신축 직후에는 설비를 적절히 배열하므로써 가능하나, 차후에 설비를 재배치할 때는 새로운 문제가 발생한다. 이러한 문제에 대한 대책으로서 진동유발 장비 및 방진처리 장비의 공진봉을 이격시키거나 이중바닥구조의 설치를 검토하여야 한다.

3. 3 방진대책

일반적으로 많이 사용되고 있는 방진재료로는 표 2에 나타난 바와 같이 철제코일스프링, 공기스프링, 방진고무, 방진패드 등이 있

으며, 각각의 방진재료는 적절한 진동수범위를 가지고 있다. 방진재료의 방진효율이나 외력에 대한 전달률은 기계의 가진진동수와 방진재료의 고유진동수와의 비로부터 구할 수 있다.

표 2 방진재료 비교

| 방진재료 | 철제코일스프링 | 공기스프링 | 방진고무 | 방진패드 |
|------------------|---------|-----------|----------|----------|
| 고유진동수 범위(Hz) | 2~10 | 1~5, 3~10 | 7~20 | 15~ |
| Attenuation 비 | 0.005 | 0.1~0.2 | 0.05~0.1 | 0.05~0.1 |
| 고유진동수 영역에서의 방진 | △ | ○ | ○ | ○ |
| 고진동의 가진력에 대한 적용성 | ○ | ○ | △ | × |
| 가격 | △ | × | ○ | ○ |
| 설계신뢰도 | ○ | ○ | △ | × |
| 균질성 | ○ | ○ | △ | ○ |
| 수명 | ○ | △ | △ | × |

철제코일스프링은 장시간 사용할 수 있으므로 낮은 공진범위에서는 고무와 같은 감쇠기구와 스프링을 함께 사용하여 성능을 향상시킬 수 있다. 또한 공기스프링은 공기가 새지 않도록 유지관리하여야 하며, 특히 저진동수에 적합하다. 방진고무는 온도에 영향을 많이 받으며, 품질이 균일하지 않고, 설계시 충분한 여유를 주어야 한다. 또한 방진패드는 방진성능이 현저히 향상되지 않으며 부수적인 목적으로 사용한다. 그러므로 본 연구에서는 보행자 및 이동장비 등에 대한 진동제어를 위하여 진동감쇠가 우수하고 설치 및 교체가 편리한 방진패드를 access floor 판과 하부의 pedestal 사이에 삽입한 경우 이중바닥구조의 동특성 해석에 대하여 연구한다.

4. 진동실험

4.1 진동수분석

진동계는 넓은 진동수 대역에 걸쳐 측정된 하나의 진동값을 제시하며, 진동수스펙트럼은 신호에 대한 자세한 정보를 제공해 주며, 진동발생부위 및 진동발생원의 위치를 찾는 데 도움이 된다. 그러나 이러한 정보는 시간상의 신호로부터 얻을 수 없으므로, 각 진동수성분을 알기 위해서는 진동수 분석을 실시하여야 한다.

4.2 가진진동수 대역의 설정

가진진동수 대역은 햄머가 시험체에 접촉한 시간에 따라 달라지므로 햄머팁의 재질에 따라 변화한다. 구체적으로 햄머팁이 강재와 같은 단단한 재질일 경우 햄머의 접촉 시간은 매우 짧아지며, 스펙트럼도 매우 높은 진동수 영역까지를 나타낸다. 그러나 가진에너지의 합은 팁의 재질에 따라 달라지지 않으므로 부드러운 팁을 사용할 경우 PSD(Power Spectrum Density : 진동수당의 에너지의 밀도)는 증가함을 알 수 있다. 그러나 고무등의 부드러운 팁을 사용하여도 수Hz 이하의 낮은 진동수로 가진하는 데는 무리가 있다.

4.3 대상구조물

본 연구에서 선정한 구조물은 그림 4에 나타낸 바와 같이 Access floor 이중바닥구조와 격자보 및 콘크리트슬래브이다. 방진패드를 삽입한 이중바닥구조와 삽입하지 않는 이중바닥구조와 동특성 해석을 위하여 실험적 모드해석을 실시하였으며, 대상구조물은 그림 4와 같이 요소와 절점으로 분할하였다.

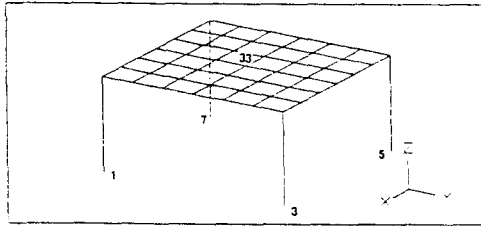


그림 4 대상구조물의 요소분할

5. 진동실험 결과

Access floor 구조의 동특성분석을 위하여 각 절점에서의 진동수전달함수는 #1절점부터 #57절점까지 요소분할된 절점에서 충격망치(Dytran, 5802A)로 3회씩 충격량을 가진하여 Access floor판위 #33절점에서의 가속도 응답을 가속도계(Dytran, 3116A1)로 측정하여 평균하였다. 또한 Access floor 구조와 콘크리트슬래브간의 전달함수는 Access floor 판위의 #33절점을 충격망치로 가진하고 콘크리트슬래브 중앙점에서의 응답으로부터 구하였다.

5.1 Access floor 구조의 동특성

그림 5는 방진패드의 Access floor 판과

pedestal 사이의 접촉부에 방진패드를 삽입한 경우와 삽입하지 않은 경우에 대한 시간영역에서의 압진동 상태를 측정하여 것으로서 방진패드를 삽입하므로써 진동응답을 1.26gal에서 1.10gal로 14%정도 감소시켰음을 보이고 있다. 또한 그림 6은 두 경우에 대하여 #15절점에서 가진하였을 경우의 #33절점에서의 응답을 진동수영역에서 측정하여 진동수 응답함수형태로 나타낸 것으로, 3개의 고유진동수가 공존하며, 이들중 계의 1차 고유진동수가 78.5Hz에서 52.5Hz로 변화되고 있으며, 변화된 공진봉의 크기는 물론 120Hz이상의 고진동수성분이 크게 감소하고 있음을 나타내고 있다.

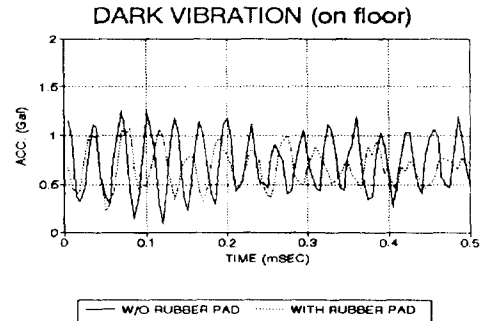


그림 5 방진패드의 유무에 따른 압진동

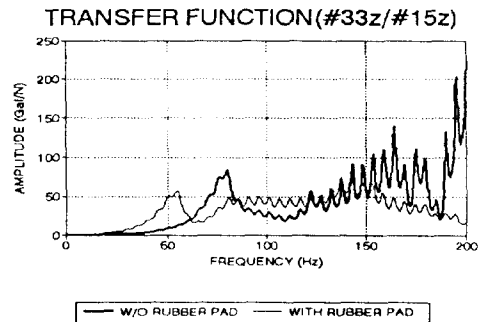


그림 6 이중바닥구조에서의 전달함수(33z/15z)

실험적 모드해석으로부터 구한 모드변수는 표3과 같으며, #1 모드가 지배적인 모드임을 나타내고 있다. 곡선적합의 정확도를 알아보기 위하여 표 4와 같은 MAC 행렬을 구하여 각 모드간의 연성정도를 확인하였으며, 그림 6의 진동수응답곡선에도 나타나 있듯이 2번째 모드는 z방향의 자유도만을 고려할 때 무시할 정도로 작음을 알 수 있다.

표 3 곡선적합에 의한 모드변수

| 모드 | 패드 없는 경우 | | | 패드가 있는 경우 | | |
|----|----------|--------|-------|-----------|--------|-------|
| | 진동수 (Hz) | 감쇠 (%) | 크기 | 진동수 (Hz) | 감쇠 (%) | 크기 |
| 1 | 76.6 | 4.7 | 830.5 | 52.3 | 7.9 | 303.9 |
| 2 | 103.8 | 0.6 | 7.3 | 101.0 | 0.4 | 0.6 |
| 3 | 127.6 | 0.5 | 9.3 | 128.0 | 0.5 | 4.9 |

표 4 MAC 행렬

| 모드 | 패드가 없는 경우 | | | 패드가 있는 경우 | | |
|----|-----------|------|------|-----------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 1 | 1.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.37 | 0.07 |
| 2 | 0.00 | 1.00 | 0.04 | 0.37 | 1.00 | 0.12 |
| 3 | 0.01 | 0.04 | 1.00 | 0.07 | 0.12 | 1.00 |

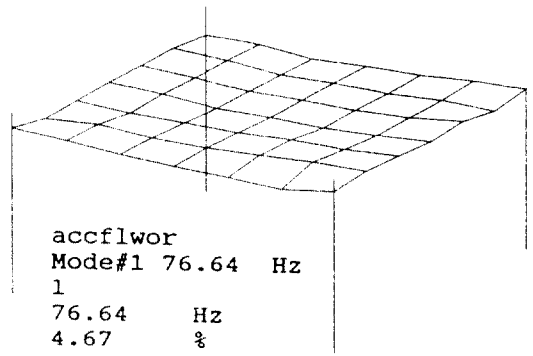
그림 7은 방진패드를 삽입한 경우와 삽입하지 않은 경우의 추정모드형상중 # 1 모드에 대한 모드형상을 나타낸 것으로(Access floor판과 Pedestal사이 접촉부의 거동을 과장하여 나타내었음), Access floor 구조의 거동이 휨거동보다는 접촉부의 불완전한 접촉 및 Access floor판의 충분한 강성으로 인한 강제운동이 지배적임을 알 수 있다.

5.2 이중바닥구조의 진동특성

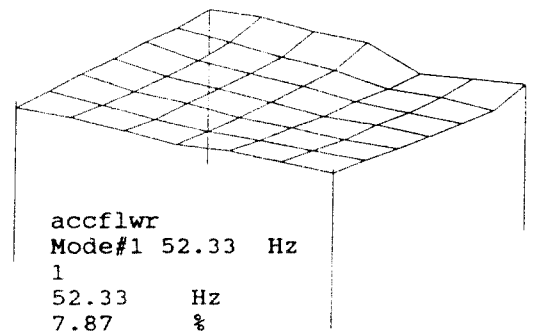
그림 8은 모형 구조물내의 콘크리트슬래브, 격자보 및 Access floor판(방진패드를 삽입한 경우포함)에서의 암진동을 측정된 것으로, 지반으로부터 전달된 진동성분이 격자보에서 0.86gal 정도이던 것이 슬래브로 전달될 경우 0.60gal로 30%정도 감소하며, Access floor로 전달될 경우 1.26gal로 46.5%정도 증가하나, 패드 삽입시에는 1.09gal로 26.7% 증가함을 알 수 있다. 이는 앞서서도 언급한 바와 같이 계의 고유진동수 변화와 방진패드의 감쇠 효과에 기인하는 것으로 사료된다.

5.3 보행하중에 의한 콘크리트슬래브의 진동특성

청정실내 주요 진동원인 사람의 보행과 각종 운반기기에 의한 콘크리트슬래브의 진동 응답변화를 검토하기 위하여 Access floor판과 콘크리트슬래브간의 전달함수를 측정하였



a) 방진패드가 없는 경우



b) 방진패드가 있는 경우
그림 7 추정 모드형상(#1 모드)

RESPONSES (EACH LOCATIONS)

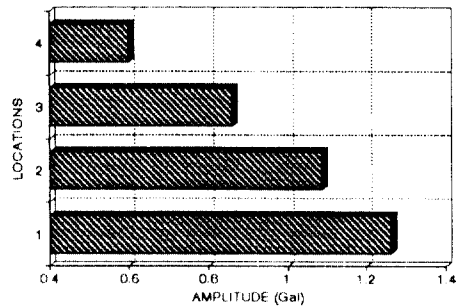


그림 8 각 위치별 암진동의 크기다. 그림 10은 패드를 삽입한 경우와 그렇지 않은 경우에 대한 진동수전달함수로서 패드를 삽입한 경우 150Hz이상의 고진동수성분에 대한 진동제어 효과가 크며, 50Hz 전후한 진동성분에도 효과가 있는 것을 나타내고 있다. 또한 그림 11은 Access floor판 위를 보행할 경우 패드를 삽입여부에 따른 콘크리트 슬래브의 응답을 암진동의 경우와 함께 진동

수영역에서 나타낸 것으로 패드를 삽입하지 않고 보행한 경우 7.48gal로 패드를 삽입한 경우의 2.84gal 보다 2.63배이상 큰 응답을 나타냄을 보이고 있다. 이의 Access floor판에 가한 보행하중이 pedestal과 판사이의 불완전한 접촉부를 통과하면서 충격하중화되어 고진동수성분의 외력이 패드가 없는 경우 증폭된 것으로 사료된다. 따라서 보행하중 산정시 신발의 재질과 하중전달경로상의 경계조건에 따라 달라짐에 유의하여야 할 것으로 생각된다.

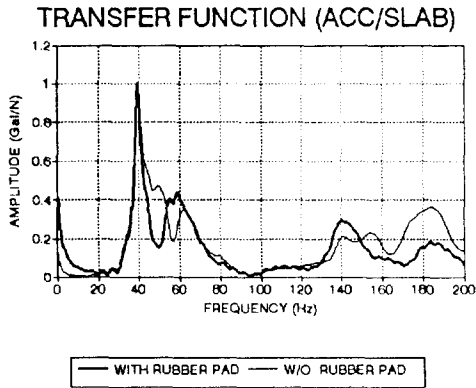


그림 9 방진패드의 유무에 따른 FRF

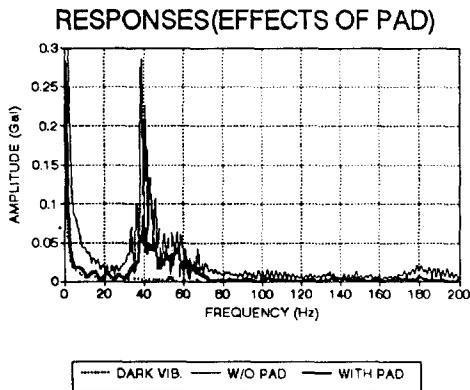


그림 10 보행시 콘크리트슬래브의 응답

6. 결론

이중바닥구조에 대한 실험적모드해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 이중바닥구조에 대한 동적응답을 진동수 영역에서 분석하므로써 고유진동수의 변화를 쉽게 관찰할 수 있었으며, 대상구조

물의 거동을 정성적으로 비교·분석할 수 있었다.

- 2) 거더위에 협진기기가 직접 놓이지 않도록 콘크리트슬래브를 삽입하므로써, 콘크리트슬래브의 진동을 거더의 진동에 비하여 30.1%정도 감소시킬 수 있었다.
- 3) 청정실내부의 청정도 유지 및 보행자, 운반장비등의 가진력이 거더에 곧 바로 전달되지 않도록 하기위한 Access floor 구조는 청정도개선 및 보행자 가진감소등에는 효과가 있으나, 거더로부터 전달되는 진동을 증폭시키므로 작업자와 Access floor 상에 놓이는 장비에 대한 진동제어 효과는 우수하지 않은 구조로 사료되며, 따라서 이에 대한 적극적인 방진대책의 수립이 필요하다.
- 4) Access floor 판과 Pedestal 사이에 방진 패드를 삽입하므로써 Access floor 구조의 동적응답은 물론 협진기기가 놓이는 콘크리트슬래브의 진동응답도 감소시킬 수 있었다.
- 5) Access floor 판위의 보행하중은 인접한 콘크리트슬래브에 까지 영향을 미치며, 보행하중 산정시 신발의 종류 및 floor 판의 경계조건등을 고려하여야 한다.

7. 참고문헌

1. Hugo Bachman and Walter Ammann , Vibrations in Structures Induced by Man an Machines, IABSE,1987,pp.14-43
2. B & K, Frequency Anlysis, B & K , 1987, pp. 318-329
3. 大林組 ,Vibration Isolation Design of Semiconductor plant , 大林組, 1986,p1-36
4. 武田壽一, 構造物の免震, 防震, 制震, 技報堂出版, 1988. pp169-186.
5. 時田保夫, 森村正直, 玉木常博, 精密防振ハンドブック, 日經印刷株式會社, 1987. pp133-138.
6. 長松昭勇, モード解析, 培風館, 1987. 1. , pp. 1-188