

FAB 구조와 결합된 제진대의 구조적 역할 규명에 대한 수치 해석 연구

Numerical Study to Identify the Structural Role of Isolation Tables Combined with FAB Structures

임 준 서* · 조 응 희** · 김 두 기†

Jun Seo Lim*, Ung Hui Jo** and Doo Kie Kim†

(Received December 18, 2025 ; Revised January 27, 2026 ; Accepted January 30, 2026)

Key Words : Isolation Tables(제진대), Basic Type(기초형식), Natural Frequency(고유진동수), Semiconductor Factory(반도체 공장), Non-structural Elements(비구조 요소)

ABSTRACT

Isolation tables used in semiconductor factories are generally classified as non-structural elements. However, isolation tables installed for vibration control are integrated with fabrication facility (FAB) structures and can change the natural frequency of the overall system. In this study, a basic FAB lattice structure and a combined model with isolation tables were modeled using ANSYS Workbench. Modal and frequency response analyses showed that the natural frequency of the basic FAB structure (15.644 Hz) changed to 12.75 Hz ~ 19.75 Hz depending on the isolation tables and type of foundation. These results indicate that isolation tables can contribute to the structural behavior of FAB structures and should be considered in the design of vibration-sensitive semiconductor factories.

1. 서 론

최근 반도체 및 디스플레이 산업은 초정밀·초집적 공정으로 발전하고 있으며 미세한 진동에도 민감한 생산 환경을 요구하고 있다. 이에 따라 사용되는 정밀 장비의 규모와 무게가 증가하고 있으며, 건물 바닥이나 주변 구조물에서 발생하는 작은 진동조차 장비 가동에 큰 영향을 미칠 수 있다^(1,2). 이러한 이유로 장비 하부에는 미세 진동을 제어하기 위한 제진대가 설치되며, 이는 공정 안정성과 장비 신뢰성 확보에

중요한 역할을 한다.

기존 연구에서는 반도체·디스플레이 제조설비 공간인 FAB(fabrication facility) 구조물에서 발생하는 미진동 제어와 구조 동특성 평가를 중심으로 다양한 접근이 시도되어 왔다. Lee et al.과 Kweon et al.은 실제 FAB 환경의 격자 보 구조를 대상으로 모드해석 및 충격 해머 실험을 수행하여 기초 형식과 구조 변수 변화가 1차 고유진동수에 미치는 영향을 규명하였으며^(1,2), 실험-해석 간의 차이를 줄이기 위한 유한요소 모델링 기법이 제시되었다. Chun et al.은 PC형 격자 보 mock-up 구조를 제작하여 실험과 수치해

† Corresponding Author ; Member, Department of Smart Infrastructure Engineering, Kongju National University, Professor
E-mail : kim2kie@kongju.ac.kr

* Member, Department of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University, Student

** Selma Co., Ltd., Senior Researcher

A part of this paper was presented at the KSNVE 2025 Annual Autumn Conference

‡ Recommended by Editor Joong-Kwan Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

석을 병행함으로써 RC 구조와 PC 구조의 동적 거동 차이, 경계조건 및 접합부 형식에 따른 주파수응답 특성을 체계적으로 비교하였다⁽³⁾. Kim et al.은 대경간 FAB 구조물의 단위 바닥구조 시스템을 대상으로 해석적 모델과 실험을 기반으로 고유진동수, 가속도 응답, 진동전달 특성을 분석하여 장비 진동 민감도 기준을 만족하기 위한 구조적 요구조건을 제시하였다⁽⁴⁾. Lee et al.은 기존 해석 및 실험만으로는 극 미세 진동 수준의 설계에 한계가 있다는 점을 지적하며, 경험적 데이터베이스 기반의 준경험적(semi-empirical) 동적 설계 시스템을 제안하여 FAB 구조물의 고유진동수 및 동 강성 예측을 자동화하는 방안을 제시하였다⁽⁵⁾. Park et al.은 클린룸 격자 보 구조의 수평진동 취약성을 개선하기 위해 대각가새 및 점성 댐퍼를 적용한 구조보강 방안을 제시하고 그 효과를 수치해석적으로 검증함으로써 격자 보 구조의 진동성능 향상 가능성을 확인하였다⁽⁶⁾. 이와 같이 기존 연구들은 FAB 구조물의 동특성 파악과 진동 저감 설계기준 마련에 중요한 기여를 해왔으나, 대부분 연구 범위가 FAB의 격자 구조물 중심으로 한정되어 있으며, 실제 대면적·고하중 장비가 설치되는 제진대에 대한 적용 방법 및 구조적 상호작용에 관한 논의는 제한적이다.

특히, 국내·외 건축물 및 내진설계기준에서는 기계·설비 및 장비 지지 구조물을 비구조요소로 분류하고 있으며^(7,8), 이 경우 해당 요소는 구조물의 전역 강성 및 질량 산정에서 제외되어 모드해석 및 동적 해석 시 구조 시스템에 포함되지 않는 것이 일반적이다. 이러한 기준 체계에 따라 반도체 FAB 구조물에 적용되는 제진대 역시 관행적으로 비구조요소로 취급되어 왔으며, FAB 구조물을 대상으로 한 대부분의 기존 연구에서도 제진대를 구조 해석 모델에 명시적으로 포함한 사례는 매우 제한적이다. 그러나 제진대는 장비와 구조물 사이에서 진동을 전달하거나 감소시키는 매개체로서 가능하며, 그 질량과 기초 형식에 따라 구조계의 고유진동수를 변화시킬 가능성이 있다. 최근에는 장비 지지 구조물이나 절연 구조물이 구조 시스템과 결합될 경우, 해당 요소의 질량 및 강성 특성에 따라 구조물의 저차 고유진동수가 변화하고, 지배적인 외부 진동 주파수 대역과 상대적 위치에 따라 공진 증폭 또는 회피 거동이 발생할 수 있음이 실험 및 수치해석을 통해 연구된 바 있다⁽⁹⁾.

따라서, 이 연구에서는 제진대를 하나의 독립된 구조적 구성요소로 보고, FAB 구조물과 결합될 때의 동적 특성을 규명하고자 한다. 이를 위해 ANSYS Workbench를 이용한 유한요소 해석(FEM)을 수행하여 FAB 기본 격자 보 모델과 제진대를 결합한 모델에 대해 모드해석 및 주파수 응답해석을 실시하고, 고유진동수 변화를 중심으로 구조적 영향성을 비교·분석하였다⁽¹⁾. 이 연구는 기존 FAB 구조물 위 제진대의 역할을 재평가하고, 향후 제진대 설계 및 구조분류 기준 마련을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 해석모델 구성

2.1 반도체 FAB구조와 제진대의 기능

일반적인 FAB 구조는 Fig. 1과 같이 오픈형 격자 보 위에 경량의 access floor가 설치된 형태로 구성되며⁽¹⁾, 이는 사람의 통행을 가능하게 하는 동시에 진동에 매우 민감한 구조적 특성을 가진다. 따라서 access floor 위에 장비를 직접 설치할 경우 지진이나 외부 진동에 의해 심각한 피해가 발생할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 반도체·디스플레이 공장에서는 제진대를 설치하여 장비에 손상을 일으킬 수 있는 진동에 대하여 대비한다.

제진대의 작동 원리는 크게 두가지로 설명할 수 있다. 첫째로, 기초 구조물과 장비 사이에서 기초 구조물의 진동 특성을 그대로 구현할 수 있는 독립 기초로써 작용한다. 이는 구조물이 갖고 있는 강성을 그대로 확보할 수 있어 독립 기초가 갖고 있는 공진 가능성을 줄여주게 된다. 이때 제진대는 질량체와 강성 조합을 통해 목표 주파수영역을 회피하

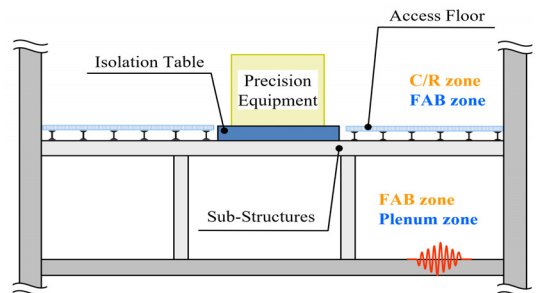


Fig. 1 FAB structure and isolation table

는 설계로 진행되게 된다. 둘째로 제진대는 스프링 및 감쇠 요소를 포함하여 외부 진동이나 장비의 진동이 제진대를 통해 전달되는 과정에서 에너지를 소산 시키는 과정으로 설계한다^(10,11). 스프링이나 감쇠 요소는 요소가 갖고 있는 성능 영역에서 진동 응답 증폭을 억제하고 구조물의 안정적인 진동 환경을 구현하도록 하게 해준다. 결과적으로 제진대는 장비 및 구조물의 사용성을 높이고 장기적인 내구성과 안전성 및 생산성을 증가시키는 역할을 수행하게 된다.

2.2 기본 FAB 구조물 모델

해석의 기준이 되는 기본 FAB 구조물의 격자 보 구조는 현재 산업에서 설계되고 있는 구조물의 설계 도면을 참고하여 Fig. 2와 같은 형태로 모델링 하였다^(3,4). 일반적으로 FAB 구조물의 격자 보는 Fig. 2와 같은 1스팬 구조가 여러 스패스로 이어져 있으며 다층으로 이루어져 있다. 이 연구에서는 해석에 소요되는 시간과 모드해석의 결과를 보다 명확하게 확인하기 위하여 비교적 간단한 모델인 1스팬 모델을 선정하여 모델링 하였다⁽⁴⁾. Fig. 2에 도시된 기본 FAB 구조물 모델의 모든 부재는 콘크리트 재료 물성치를 적용하여 모델링 하였으며, 이 연구에서 사용된 강제 물성치는 Fig. 3(a) 제진대 하부의 철골기초 모델에 한하여 적용되었다.

격자보의 크기는 21 m × 17.6 m이며, 기둥(column)과 서브기둥(sub-column)의 크기는 각각 10 m, 5 m이다. 경계조건의 경우 기둥의 하부는 지면과 닿는 부분으로 완전 구속 상태를 설정하였으며, 기둥의 최

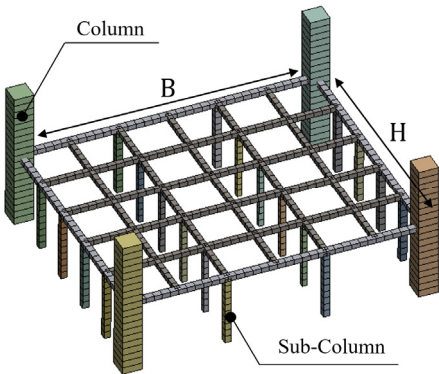
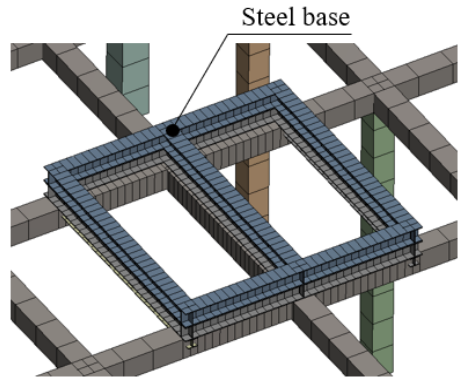


Fig. 2 Basic FAB structure model

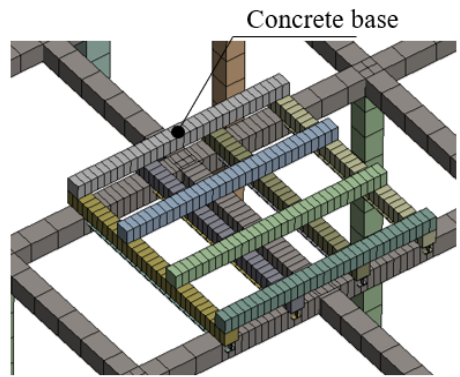
상부는 수직방향의 구속은 제외한 수평 방향의 구속만을 설정하였다. 기둥은 압축 방향의 변형은 허용시키며 수평 흔들림은 억제하는 방법으로 비현실적인 응력을 방지하였다. 전체적인 모델링 과정에 사용한 재료 물성치는 Table 1과 같다.

2.3 기초형식에 따른 제진대 결합모델

기본 FAB구조물과 고유진동수 변화의 경향성을 비교·분석 하기위한 제진대 결합 모델의 기초형식은 Fig. 3과 같이 철골기초와 콘크리트 기초를 적용하였



(a) Steel base model



(b) Concrete base model

Fig. 3 Types of basic models

Table 1 Material properties used in the analysis

Material properties	Steel	Concrete
Poisson's ratio	0.3	0.18
Density [ρ]	7850 kg/m ³	2300 kg/m ³
Elastic modulus [E_c]	200 000 N/mm ²	30 000 N/mm ²

으며 기초 형태는 현장에서 많이 사용하고 있는 구조 형태로 모델링 하였다. 철골 기초의 H빔 규격은 H-250 × 250 × 9 × 14을 사용하였고 콘크리트의 단면 제원은 250 × 250 크기를 사용하였다. 철골 기초, 콘크리트 기초 모두 2층구조이며, Fig. 4와 같이 기초 위에 올라가는 일체형 콘크리트 제진대의 크기의 경우 4000 mm × 4000 mm × 300 mm이다.

2.4 해석 방법 및 절차

Step 1. 기본 FAB 모델, step 2. FAB 모델과 철골 기초를 적용한 제진대 결합 모델, step 3. FAB 모델과 콘크리트 기초의 결합 모델로 나누어 각각 ANSYS Workbench를 이용하여 모드해석과 주파수응답해석을 수행하였다. 또한 해석의 신뢰성 확보를 위해 X, Y, Z 방향으로 질량참여율이 90%가 넘도록 1600개의 충분한 모드 수를 도출하였다.

모드해석은 구조물의 고유진동수와 모드 형상을 확인할 수 있는 이론적 분석 방법이며, 공진이 발생할 가능성이 있는 주파수 영역을 제시한다. 그러나 실제 가진 조건에서 구조물이 어떤 주파수에서 얼마나 크게 반응하는지는 모드해석만으로는 판단하기 어렵기 때문에 구조물의 고유진동 특성과 실제 응답 특성을 종합적으로 파악하기 위해 FRF 기반의 주파수 응답해석을 같이 병행하였다. 주파수응답해석은 외부 진동에 대한 실제 응답 크기와 공진 특성을 정량적으로 확인할 수 있어, 구조물의 현실적 동적 거동을 평가하는 데 필수적이다.

따라서, 주파수응답 해석 시 격자 보에서 가장 취약할 것으로 예상되는 보 중앙지점에 단위하중을 가하여 단위하중에 대한 주파수별 응답특성을 도출하였다⁽¹⁻³⁾. 제진대 결합 모델의 경우 제진대가 격자 보 중앙에 위치하게 되며 외부하중은 제진대 판 위의 중앙지점에 단위하중으로 가하였다.

3. 분석 결과

3.1 유한요소 모델 해석 결과

(1) 기본 FAB 구조물 모델

Step 1. 기본 FAB 모델의 해석결과 Fig. 5와 같이 1차 모드로 추정되는 고유진동수는 약 15.644 Hz 대역으로 나타났다. 수평 보들이 격자형태로 연결된 격자구조에서는 각 보의 교차 지점에서 힌지와 유사한 자유도를 갖기 때문에 주로 수직 방향의 굽힘 변형을 기반으로 한 모드 형상이 1차 모드 형상으로 나타난다. 특히 서브 기둥이 설치되지 않은 내부 중앙 보들은 수직 방향 구속이 부족하여 변형이 집중되는 특성을 보이므로 중앙부에서 상·하 방향의 진동 모드가 두드러지게 관찰된다. 주파수 응답 해석에서도 동일한 특성이 확인되었다. 단위하중을 가한 위치에서의 최대 가속도 응답이 나타나는 주파수 대역은 Fig. 6과 같이 15.443 Hz로 나타났다.

(2) 철골 기초를 적용한 제진대 결합 모델

Step 2. 기본 FAB 모델에 철골 기초를 적용한 제진대 결합 모델의 해석결과 Fig. 7과 같이 1차 모드로 추정되는 고유진동수는 약 19.289 Hz 대역으로 나타났으며 주파수 응답 해석결과는 Fig. 8과 같이 19.75 Hz로 나타났다.

(3) 콘크리트 기초를 적용한 제진대 결합 모델

Step 3. 기본 FAB 모델에 콘크리트 기초를 적용한 제진대 결합 모델의 해석결과 Fig. 9와 같이 1차 모드

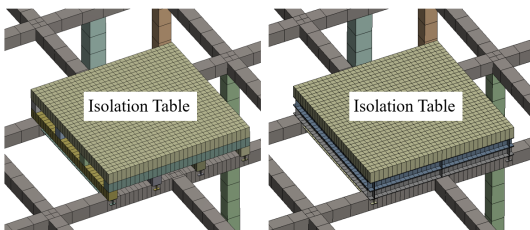


Fig. 4 Combined isolation table model

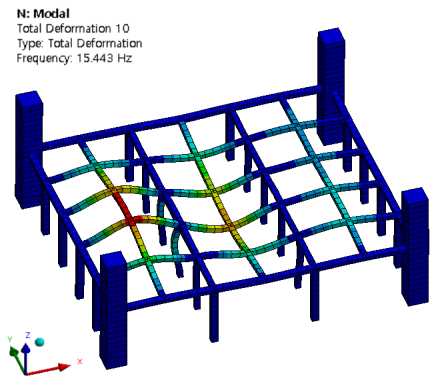
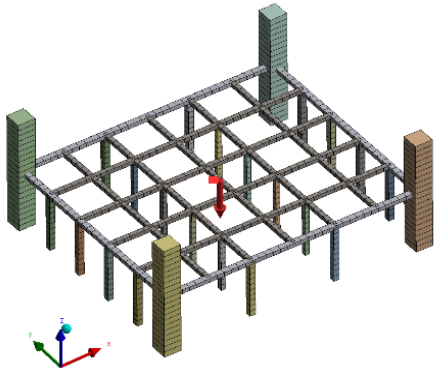
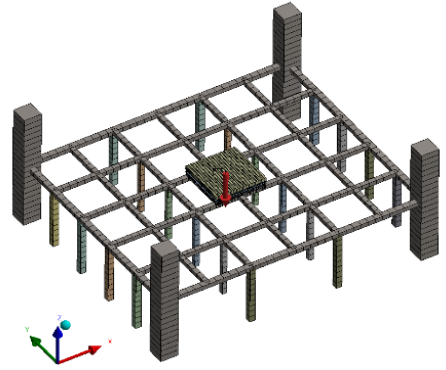


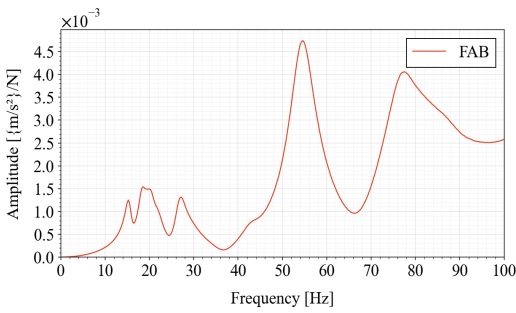
Fig. 5 Mode shape of the FAB model



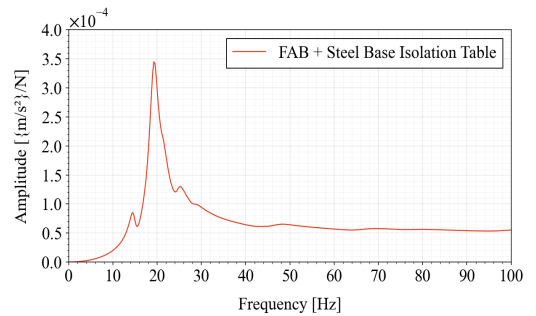
(a) Analysis model of FAB structure



(a) Analysis model of FAB with a steel-base isolation table



(b) Frequency response of the FAB structure



(b) Frequency response of the FAB with steel base isolation table

Fig. 6 Analysis model and frequency response of the FAB structure

Fig. 8 Analysis model and frequency response of FAB with a steel base isolation table

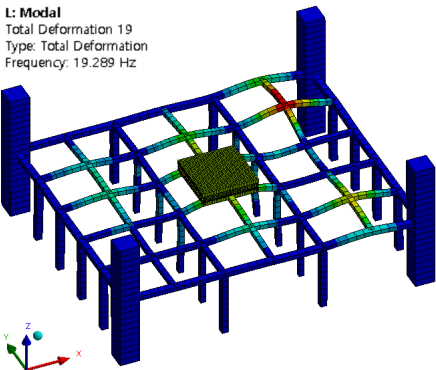


Fig. 7 Mode shape of the FAB with a steel-base isolation table

로 추정되는 고유진동수는 약 12.644 Hz 대역으로 나타났으며 주파수 응답 해석결과는 Fig. 10과 같이 12.75 Hz로 나타났다.

3.2 해석결과 분석

이 연구에서 수행한 반도체 디스플레이 공장의 유한요소 모델인 기본 FAB 구조물은 고유진동수가 약 15 Hz 대역에서 나타났다. 해당 모델에 철골기초를 적용한 제진대 결합 모델의 경우 약 19 Hz ~ 20 Hz 대역에서 나타났으며 콘크리트 기초를 적용한 제진대 결합 모델의 경우 약 12 Hz ~ 13 Hz 대역에서 나타나 철골기초 적용 모델보다 약 7 Hz 낮은 주파수 응답이 도출되었다. 이러한 고유진동수의 차이가 발생하는 이유는 일반적으로 콘크리트 기초는 질량이 크고 상대적으로 강성이 낮아 시스템 전체의 고유진동수를 낮추는 경향이 있다고 판단된다. 반면 철골기초는 콘크리트에 비해 질량이 작고 단면 강성이 커 FAB 구조의 전체 시스템의 동가 강성을 증가시키므로, 동일한 일체형 제진대를 상부에 배치하더라도 기초구조에 따라 전체

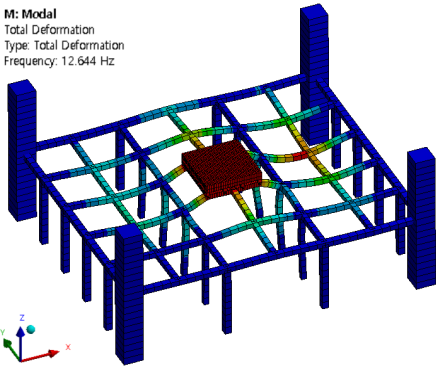
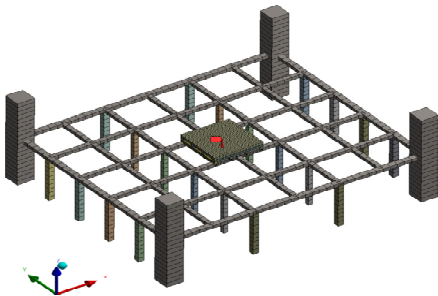
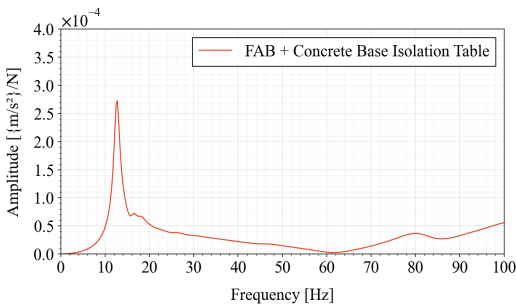


Fig. 9 Mode shape of the FAB with a concrete base isolation table



(a) Analysis model of FAB with a concrete base isolation table



(b) Frequency response of the FAB with a concrete base isolation table

Fig. 10 Analysis model and frequency response of FAB with a concrete base isolation table

FAB 구조의 고유진동수가 더 높은 주파수 영역에서 형성되는 것으로 판단된다.

또한, 기초를 적용한 제진대 결합모델의 경우 해석 결과 기본 FAB 모델의 15 Hz 기준으로 고유진동수

가 변화하는 것을 알 수 있다. 따라서 비구조요소로 취급되었던 제진대의 경우 FAB 구조물에 결합 시 일체거동 하여 전체 구조 시스템의 동특성을 변화시킬 수 있다는 점을 고려하여 구조체 요소로서의 재평가 가능성을 제시한다.

4. 결 론

이 연구에서는 기본 FAB 구조물과 결합된 제진대가 전체 구조시스템의 동적 특성에 미치는 영향을 규명하기 위해 수치해석 기반의 모드해석 및 주파수 응답해석을 수행하였다. 기본 FAB 구조물 모델은 약 15.644 Hz의 1차 고유진동수가 나타났으며 철골기초를 적용한 제진대 모델을 기본 FAB 구조물에 적용할 경우 약 19 Hz ~ 20 Hz로 증가하였다. 반면, 콘크리트 기초를 적용한 제진대 모델의 경우 약 12 Hz ~ 13 Hz로 철골 기초를 적용한 제진대 결합 모델보다 약 7 Hz 감소된 고유진동수가 도출되었다. 이러한 결과는 제진대의 질량 및 기초 형식이 전체 FAB 구조 시스템의 등가 강성과 질량 분포에 직접적인 영향을 미쳐 고유진동수를 변화시킨다는 점을 명확하게 보여준다. 이러한 관점은 산업용 진동 테이블을 대상으로 한 실제 사례 연구에서도 확인되었으며, 장비 프레임과 지지 구조물의 동적 특성이 진동 전달 및 공진 발생에 중요한 영향을 미치는 것으로 보고되었다⁽¹²⁾.

특히, 제진대는 기존 설계 기준 및 선행 연구에서 단순 비구조요소로 분류되어 구조해석 및 설계 검토에서 제한적으로 고려되어 왔으나, 이 연구 결과는 제진대를 구조 해석 모델에 포함할 경우 FAB 구조물과 결합된 전체 구조 시스템의 지배적인 동적 특성이 기초 형식에 따라 실질적으로 변화할 수 있음을 보여준다. 이는 제진대의 기초 형식이나 재료의 절대적인 우수성을 비교하기 보다는, 제진대의 질량 및 강성 특성이 FAB 구조물의 등가 강성 및 질량 분포에 영향을 미쳐 구조 시스템의 응답 특성을 변화시킬 수 있음을 수치해석적으로 확인한 결과로 해석될 수 있다. 따라서 제진대를 기준과 같이 단순 장비 부속 요소로 간주하여 구조 해석에서 배제할 경우, FAB 구조물의 실제 동적 거동을 충분히 반영하지 못할 가능성이 있다고 판단된다. 또한 이 연구는 이상화된 단일 스캔 기반의 선형 해석 모델을 사용하였으므로, 향후 연구에서는 다층·다경간 FAB 구

조물로의 확장, 제진대-구조물 접합부의 비선형 거동 반영, 그리고 실험 또는 현장 계측 기반 검증을 통해 제진대가 FAB 구조물의 동적 거동에 미치는 영향을 보다 정량적으로 규명할 필요가 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 연구는 2025년도 중소벤처기업부의 기술개발사업 지원에 의한 연구임(RS-2025-02314199).

References

- (1) Lee, H. K., Kweon, H. O. and Kim, D. H., 1994, A Study on Dynamic Design for the Sub-micro Vibration Control of Substructure in Semi-conductor Factory, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 52~57.
- (2) Kweon, H. O., Park, H. D., Lee, H. K. and Kim, D. H., 1994, A Study on the Dynamic Properties of Substructure in a Semi-conductor Factory, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 58~61.
- (3) Chun, C. K., Kim, K. B., Son, S. W. and Lee, H. G., 2004, A Dynamic Structural Design of PC Type Sub-structure for Next-generation FAB Based on Dynamic Test and Simulation, Journal of the Semiconductor & Display Equipment Technology, Vol. 3, No. 4, pp. 51~55.
- (4) Kim, S. J., Lee, S. S., Chun, H. M., Kwon, Y. H., Kang, J. H. and Hong, K. P., 2008, The Response Assessment on the Sub-micro Vibration Isolation Floor System of the Long-span Structure for Technology Facilities, Proceedings of the AIK Conference, Vol. 28, No. 1, pp. 89~96.
- (5) Lee, H. J., Lee, K. O. and Lee, G. S., 2012, Design and Implementation of a Dynamic Structure Design System for Ultra Precision FAB Structure Based on Semi-empirical Method, Proceedings of the KIPS Annual Autumn Conference, Vol. 19, No. 2, pp. 1245~1248.
- (6) Park, J. H., Moon, B. W. and Min, K. W., 2006, Improvement of Dynamic Characteristics of Lattice Girder System for Clean Rooms, Proceedings of the AIK Conference, Vol. 26, No. 1, pp. 9~12.
- (7) Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2022, Seismic Design Criteria for Buildings, Korea Design Standard, KDS 41 17 00, Gyeonggi-do, Korea, pp. 72~94.
- (8) American Society of Civil Engineers, 2022, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures ASCE Standard, American Society of Civil Engineers, Reston, Chapter 13, VA, United States, pp. 121~134.
- (9) Liang, Q., Zhou, Y., Wang, D., Luo, W., Li, J. et al., 2024, Shaking Table Test of Vertical Isolation Performances of Super High-rise Structure under Metro Train-induced Vibration, Journal of Building Engineering, Vol. 82, 108323.
- (10) Kim, D. Y., Chun, C. K. and Kwon, Y. C., 2014, A Study on Semi-active Vibration Isolation Table using a Nonlinear Analysis of the MR Damper, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 24, No. 11, pp. 861~867.
- (11) Jung, T. U., 2021, Structural Design of Electro-magnetic Damper Using Electric Motive Force, Proceedings of the 24th International Conference on Electrical Machines and Systems(ICEMS), pp. 1529~1532.
- (12) Cristea, A. F., Bălcău, C. M. and Haragas, S., 2023, Study of Case Regarding Analysis of Vibration at Industrial Vibrating Tables, Proceedings of the 27th International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers(CSCC), pp. 92~97.