



혁신 LMS 라미 설비의 진동 및 소음 진단

이동진^{a,*}

Vibration and Noise Diagnosis of IT Innovative LMS LAMI System

Dong Jin Lee^{a,*}^a Department of Semiconductor Equipment Development, Korea Polytechnics

ARTICLE INFO

Article history:

Received	21	April	2026
Revised	25	May	2026
Accepted	28	May	2026

Keywords:

Vibration diagnosis
Noise measurement
LAMI equipment
Semiconductor process
Precision machinery
Field of view (FOV)

ABSTRACT

This paper presents the vibration and noise diagnosis results for a Lamination Machine Interface (LAMI) unit used in the IT laser multilayer system (LMS) innovation process. Acceleration sensors and microphones were installed at three stations—Inspection, Chamber-1, and Chamber-3—to simultaneously acquire vibration and noise data. Vibration displacement was evaluated over the 2.5-100 Hz band by double-integrating the acceleration signal in the frequency domain; a 2.5 Hz high-pass filter suppressed low-frequency drift. Vibration levels at all measurement points remained below 10% of the camera FOV specification ($\pm 150 \mu\text{m}$), and the noise level did not exceed 68.7 dB(A)—well within the 85 dB(A) workplace standard. During UVRW stage material transport, vibrations increased up to 15 times in Chamber-1 and five times in Chamber-3, with dominant low-frequency components below 5 Hz. These findings confirm acceptable equipment performance for precision optical inspection and establish a baseline dataset for vibration-based quality monitoring.

1. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

반도체 및 디스플레이 제조 공정에서 정밀 기계 설비의 진동과 소음은 제품의 정밀도와 반복성 등 품질에 직접적인 영향을 미치며 이를 잘 측정, 분석 및 진단하여 관리 및 제어해야 설비의 가치를 높이고 성능을 보장하게 된다고 되어 있다^[1, 2]. 특히, 카메라 기반의 광학 검사 시스템이 탑재된 설비의 경우, 설비 운전 중 발생하는 미세 진동이 카메라의 FOV 안정성을 저해하여 떨리게 함으로써 검사 정확도를 떨어뜨릴 수 있다. 또한, 이로 인해 기계 진동과 소음이 수 μm 급 이하의 초정밀 제품 및 설비의 품질과 신뢰성에 영향을 미칠 수 있음은 분명하다고 알려져 있다^[3]. Kim and

Park^[2]은 정밀 기계 설비에서 진동이 가공 정밀도와 반복성에 미치는 영향을 분석하고 능동 진동 제어 방법론을 제시하였다. Gordon^[3]은 진동에 민감한 반도체 및 광학 장비에 대한 일반 진동 허용 기준 (VC criteria)을 제안하였으며, 이는 본 연구에서 적용한 FOV 기반 판정 기준의 이론적 배경이 된다. Lee and Kim^[4]은 MEMS 가속도계를 활용한 정밀 제조 설비의 진동 진단 방법을 제시하였으며, 본 연구에서는 이를 참조하여 B&K 압전형 센서 기반 측정 체계를 구성하였다. 그러나, 이러한 설비의 핵심 검사 부분에 해당하는 카메라부의 성능과 기계 구조물의 진동을 직접 비교하여 평가한 사례가 알려져 있는 것은 드물다고 할 수 있다.

본 연구에서는 카메라가 장착된 구조물의 변위 진동량을 카메라의 FOV 분해능과 직접 비교하는 지표로 제안하였다. 또한, 제안된

* Corresponding author. Tel.: +82-31-650-7274

E-mail address: djvibra@kopo.ac.kr (Dong Jin Lee).

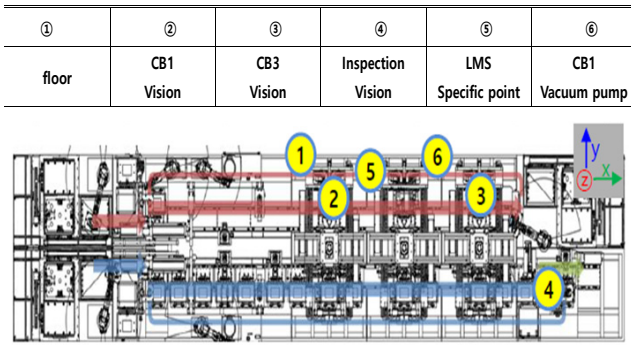


Fig. 1 LMS system and vibration & sound measurement points (Inspection station, CB1, CB3 and etc)

방법을 이용하여 설비의 동적 성능을 정량적으로 평가하여 향후 설비에서 생산되는 제품 품질과도 비교하는 척도로 삼고자 한다.

Laser Multi-layer System (IT LMS) 혁신 공정에서 사용되는 Lamination Machine Interface (LAMI) 설비는 레이저 적층 공정과 정밀 광학 검사를 동시에 수행하는 복합 설비로서, 설비 내 물류 이송 장치(UVRW 스테이지)와 다관절 로봇, up/down 유닛과 방식의 물류 구동에 의한 연속적 혹은 충격 진동 등이 카메라 검사 정밀도에 미치는 영향에 대한 정량적 진단이 필요하다. 한편, 구조 진동에 대한 ISO나 국제 standard는 주로 회전체 진동에 대해서는 규정이 되어 있으나 직선 운동하는 stage 등에 대해서는 없는 편이다^{4,6)}. 따라서, 설비 구동시 진동과 설비의 검사 기능에 해당하는 비전 카메라 성능 간의 상관 관계를 분석하고 판단하는 것은 진단의 정량화와 관리 측면에서도 의미가 있다고 볼 수 있다.

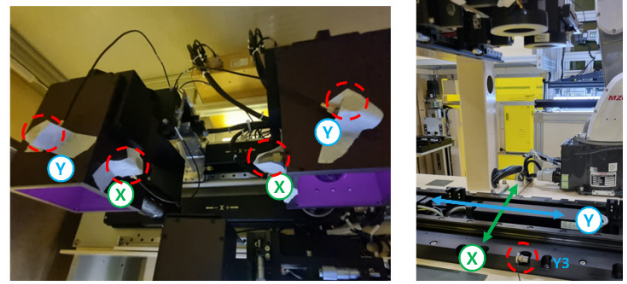
본 연구에서는 Fig. 1에서 나타낸 것처럼, LAMI 설비의 서브 유닛 중 Inspection, Chamber-1(이하CB1), Chamber-3(이하CB3) 등 3개 스테이션에서 B&K 계측 장비를 활용하여 진동 및 소음을 동시 측정하고, 설비 구동 상태(전원만 들어와 있는 before moving 상태, 정상 동작하는 After moving 상태)에 따른 진동 변위 및 소음 수준을 정량적으로 평가하였다.

아울러, 물류 이송에 따른 저주파 진동 특성을 주파수 스펙트럼 분석을 통해 규명하여, 향후 설비 진동 저감 대책 수립의 기초 자료를 제공하고자 한다.

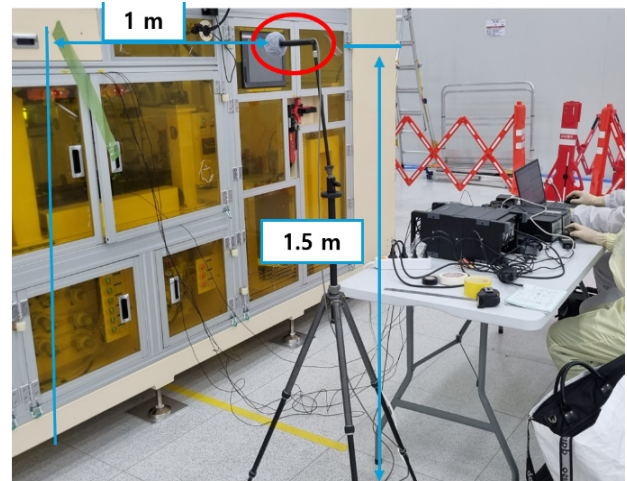
2. 측정 방법

2.1 측정 장비 및 설치

진동 및 소음 측정에는 B&K VIBRO 사의 FFT 분석기(Pulse 3050-A-060), 신호 변환 증폭기(Nexus Amplifier Type 2692), 가속도 센서(Accelerometer Type 4371, 감도 9.84 pC/g, 주파수 범위 0.1 Hz ~ 12.6 kHz), 마이크로폰(Type 4189, 감도 50 mV/Pa)



(a) Vibration measurement setup (points and direction)



(b) Acoustic measurement setup
(1 m apart from the equipment and 1.5 m height)

Fig. 2 Vibration and acoustic measurement setup

을 사용하였다.

가속도 센서는 Fig. 2에서 나와 있는 것처럼, LAMI 설비 내 두 대의 카메라 각각에 X, Y 방향으로 2개씩, rail 부에 Y 방향 1개를 추가하여 총 5개 채널을 구성하였다. 소음 마이크로폰은 설비 중에서 가장 소음 수준이 높은 지점으로 추정되는 위치를 4군데 정도 선정하여 설비로부터 1 m 거리, 지면으로부터 1.5 m 높이에 설치하여 진동 측정과 동시에 계측하였다. 측정 위치는 Inspection, Chamber-1(CB1), Chamber-3(CB3)의 3개 스테이션이며, 각 스테이션에서 설비 정지(no moving) 및 구동(moving) 상태를 각각 60초씩 3회 반복 측정하였다. FFT 분석 조건은 다음과 같다: 샘플링 주파수(Fs) 256 Hz, 분석 주파수 대역 0 ~ 100 Hz, 주파수 분해능(Δf) 0.5 Hz, 윈도우 함수 Hanning window 적용, Linear averaging 10회, 센서 장착은 측정면에 wax 또는 자석 방식으로 부착하였으며, 장착 공진 주파수가 측정 대역 상한(100 Hz)을 충분히 초과하는 것을 확인하였다.

측정 환경 온도는 약 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 였으며, 외부 충격이나 작업자 활동에 의한 영향을 최소화하기 위해 측정 시간대를 조정하였다.

3. 측정 결과의 분석

3.1 측정 결과 분석 방법 정의

진동 변위 평가는 FFT 분석기로 취득한 가속도 신호를 주파수 영역(frequency-domain)에서 2회 적분하여 변위로 환산한 후, 2.5~100 Hz 대역의 전체 RMS 값으로 평가하였다. 주파수 영역 이 중 적분은 시간 영역 적분 대비 저주파 drift 및 noise amplification 문제를 근본적으로 억제하는 방법으로서, DC 성분 및 저주파 drift 제거를 위해 하한 주파수를 2.5 Hz로 설정하는 고역통과 필터링 (high-pass filtering)을 병행 적용하였다. 이는 B&K Pulse 분석 시스템의 표준 신호처리 절차에 따른 것으로, 측정 주파수 대역 (2.5~100 Hz) 내에서 신뢰성 있는 변위 환산이 가능하다. 각 스테이션에서 60초씩 3회 반복 측정하여 진폭이 가장 큰 구간의 데이터를 대표 값으로 선정하였다. 설비 구동 시 모든 지점의 진동 수준은 카메라의 스펙(FOV, $\pm 150 \mu\text{m} = 106 \mu\text{m rms}$)과 비교하여 평가하였으며, FOV의 10% 미만(약 $10.6 \mu\text{m rms}$)을 정밀 검사에 영향이 없는 안전한 진동 수준의 판정 기준으로 설정하였다. 이 기준의 근거는 광학 검사 시스템에서 이미지 블러(blur)의 임계 값이 픽셀 해상도의 1/3 이하 수준으로 알려져 있으며^[3], FOV 대비 10% 수준의 변위는 노출 시간(exposure time) 내 적분 변위 관점에서 광학계 분해 한계 이하에 해당하기 때문이다. 설비 구동 상태는 설비 전원만 인가된 No Moving 상태와 UVRW 스테이지가 실제 물류를 이송하는 After Moving 상태로 구분하여 반복 측정 후 비교 분석하였다. 소음 측정은 설비 발주처의 요청에 의해, 작업 환경 기준 적합성 확인의 부가 목적으로 수행되었으며, dB(A) 기준으로 설비 설치 예정지 소음 규정인 85 dB(A)와 비교하였다. 소음 마이크로폰 신호와 진동 신호는 각 경우마다 동시에 수집하여 상관성을 검토하였다.

3.2 분석 결과

먼저, 진동과 소음 측정 결과를 Table 1에 요약하였다. Inspection 스테이션에서 After Moving 상태 시 X1 방향 최대 $4.98 \mu\text{m rms}$ 로 카메라 스펙의 약 4.7% 수준이었다.

CB1에서는 After Moving 상태에서 Y1 방향 최대 $3.45 \mu\text{m rms}$, CB3에서는 Y1 방향 최대 $13.0 \mu\text{m rms}$ 로 나타나 CB3의 진동 수준이 가장 높았다. Before Moving 상태에서는 모든 측정 지점에서 $3 \mu\text{m rms}$ 이하를 유지하여 배경 환경 및 설비 자체 진동의 영향이 미미하였다.

소음의 경우는 After Moving 상태에서 최대 68.7 dB(A)로, Before Moving 상태(67.2 ~ 67.7 dB(A)) 대비 약 1 dB(A) 내외의 증가를 보였으며, 설비의 설치 예정지 소음 규정인 85 dB(A) 대비 약 16 dB(A)의 충분한 여유를 확보하여 작업 환경 기준에

Table 1 Summary of vibration and noise measurements based on operating conditions

Operating condition	Before moving ($\mu\text{m rms}$)						After moving ($\mu\text{m rms}$)					
	x1	y1	x2	y2	y3	Noise (dB(A))	x1	y1	x2	y2	y3	Noise (dB(A))
Inspection	0.73	0.81	0.88	0.75	0.95	67.6	4.98	1.99	4.03	1.80	1.27	68.7
CB1	0.23	0.19	0.33	0.21	0.86	67.7	1.24	3.45	1.29	3.12	0.87	68.5
CB3	2.25	0.423	2.25	2.94	0.93	67.2	6.78	13.0	7.60	12.8	1.17	68.2

Table 2 Summary of vibration levels at the UVRW stage based on operating conditions

Operating condition	Before moving ($\mu\text{m rms}$)		After moving ($\mu\text{m rms}$)	
	x1	y1	x2	y2
CB1	1.87	2.06	30.6	30.6
CB3	14.0	12.6	60.2	59.2

적합한 수준임을 확인하였다.

참고로, Table 1은 각 스테이션의 카메라 마운트 구조물에서 측정된 진동 수준을 나타내며, After Moving 상태에서 CB3이 가장 높은 진동 수준(Y1 방향 최대 $13.0 \mu\text{m rms}$)을 기록하였다. 반면, Table 2는 UVRW 스테이지 암(arm) 자체에서 측정된 진동으로 측정 위치가 다르기 때문에 수치 범위가 상이하다. 4축으로 구동하는 UVRW 스테이지의 물류 이동 전후 진동 변화를 분석한 결과, CB1에서는 이동 전 약 $2 \mu\text{m rms}$ 에서 이동 후 약 $30 \mu\text{m rms}$ 로 약 15배 증가하였고, CB3에서는 이동 전 약 $12 \mu\text{m rms}$ 에서 이동 후 약 $60 \mu\text{m rms}$ 로 약 5배 증가하였다(Table 2). 스테이지에서 발생한 진동이 카메라 마운트 구조물로 전달되는 과정에서, CB1의 경우 구조적 특성에 의해 특정 주파수 성분이 증폭되어 절대 진동량 대비 카메라 마운트 진동이 상대적으로 높게 나타나는 것으로 판단된다.

한편, 주파수 스펙트럼 분석 결과, inspection station에서는 물류방향의 수직방향인 X방향과 물류 방향인 Y방향의 주파수 특성이 다른 것을 알 수 있는데(Fig. 3~4), 이는 구조적 특성에서 기인하는 것으로 판단된다.

특히, Inspection station의 X방향 주파수 스펙트럼에서는 20 Hz와 40 Hz 대역에서 $3 \mu\text{m rms}$ 이하의 진동 변위 성분이 존재하는 것을 알 수 있다.

CB3는 물류 이동에 의한 진동은 주로 5 Hz 이하 저주파 대역에 상대적으로 집중되어 있으며(Fig. 5), 이에 반해, CB1의 경우는 20 Hz와 40 Hz근방의 대역까지 최대 $7 \mu\text{m rms}$ 변위까지 진동 peak가 관찰되는 것을 볼 수 있다(Fig. 6).

이런 차이는 스테이지의 가감속 운동에 의한 관성력과 CB1

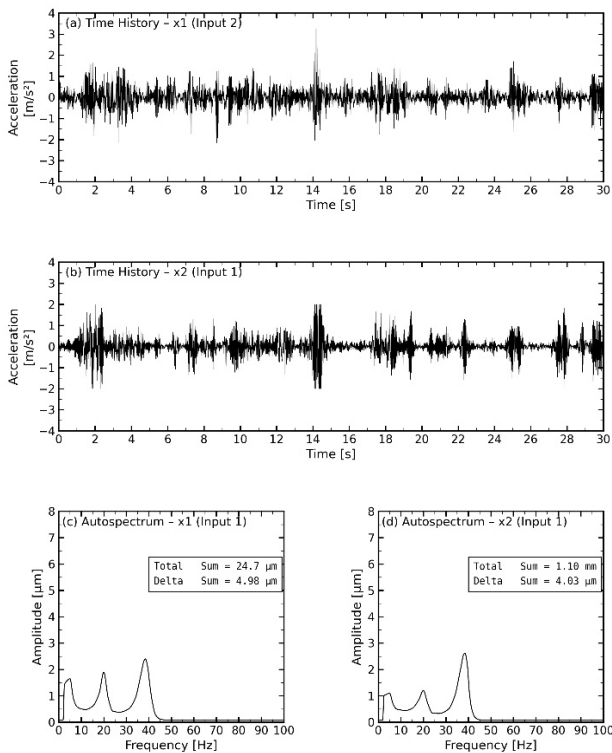


Fig. 3 Time-domain vibration signals and FFT spectra in the x-axis during movement at the inspection station

의 구조적 특성에서 기인하는 것으로 판단된다. 특히, 20 Hz, 30 Hz, 그리고 35 Hz 대역의 peak 성분은 UVRW stage의 Moving 전후 스펙트럼 비교(Fig. 7)에서 이동 후에만 증가하는 것으로 보아 스테이지 구동 가진(forced vibration)에 의한 응답으로 추정된다. 정확한 원인 규명을 위해서는 impact hammer test를 통한 modal analysis가 필요하나, 현장의 조립 및 양산 일정 제약으로 인해 본 연구에서는 수행하지 못하였으며 향후 후속 연구에서 필요시 진행할 예정이다.

Table 2로부터 스테이지 자체의 절대 진동량은 CB3(최대 60 $\mu\text{m rms}$)가 CB1(최대 30 $\mu\text{m rms}$)보다 크지만, Table 1의 카메라 마운트 구조물 진동은 CB1(13.0 $\mu\text{m rms}$)이 CB3(3.45 $\mu\text{m rms}$)보다 높게 나타난다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 각 측정 위치(스테이지 vs 카메라 마운트)의 차이 및 CB1의 구조적 특성에서 기인한다. 두 경우 모두 카메라 FOV 스펙(106 $\mu\text{m rms}$) 대비 90% 이상의 마진을 확보하고 있어 정밀 광학 검사에 적합한 수준이다.

두 카메라 간 상대 진동 범위는 1 $\mu\text{m rms}$ 미만으로 동등 수준이다. 이에 대한 양호한 수준의 근거로는, rail부(Y3)의 진동은 측정 이전에 실시된 사전 조사 시에 협의와 조언에 따라 rail 연결부의 단차를 미세 정렬을 거쳐 조정하였다.

또한, rail부의 수직방향 up/down 구동 속도 프로파일을 S자 형태로 변경하여 적용한 결과, 1.3 $\mu\text{m rms}$ 이하로 매우 낮은 수준을

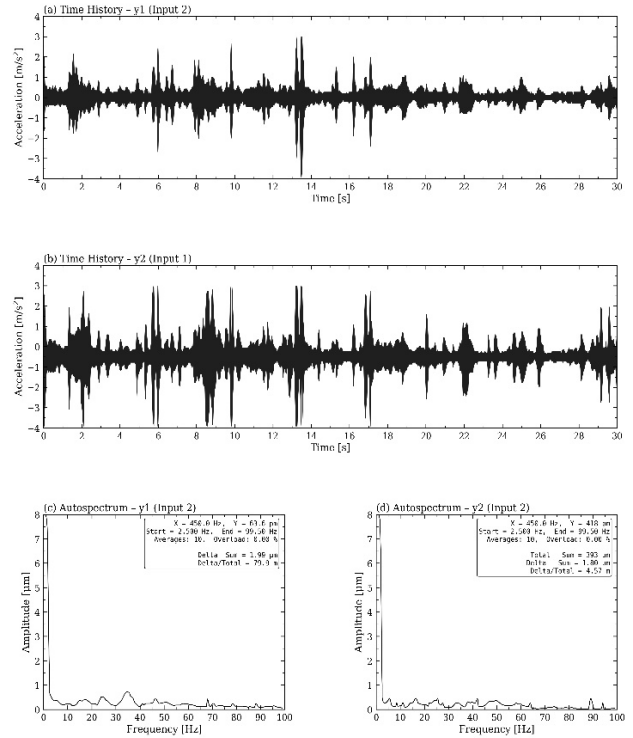


Fig. 4 Time-domain vibration signals and FFT spectra in the y-axis during movement at the inspection station

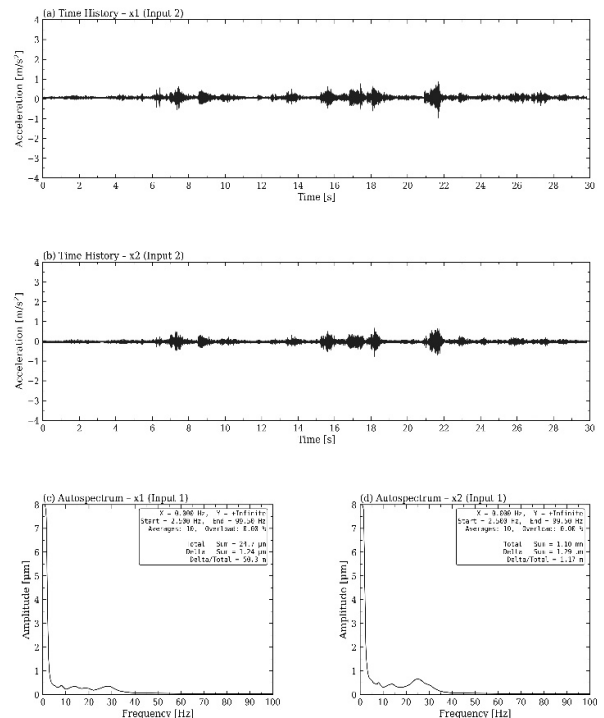


Fig. 5 Time-domain vibration signals and FFT spectra in the x-axis during movement at the CB3

유지하는 것을 볼 수 있다.

UVRW stage의 암진동과 물류 이동에 따른 증가량 및 주파수

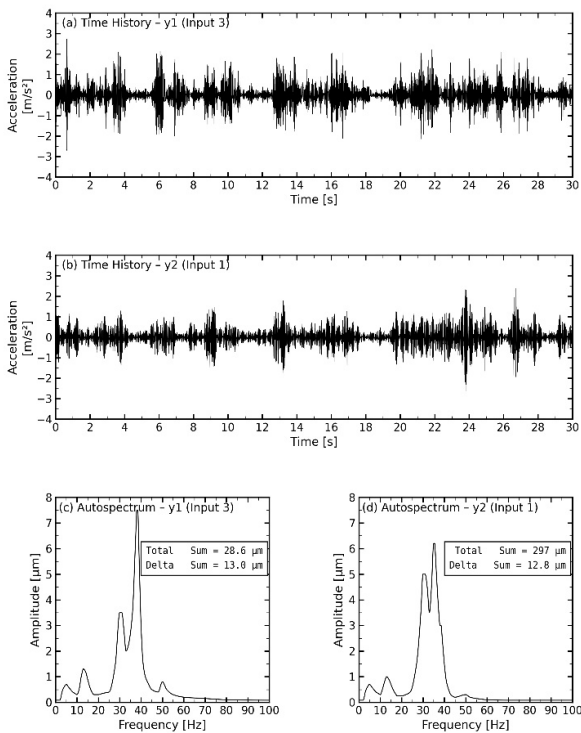


Fig. 6 Time-domain vibration signals and FFT spectra in the y-axis during movement at the CB1

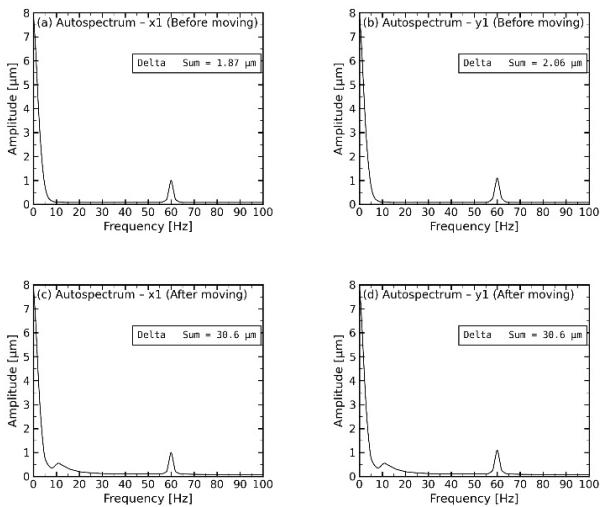


Fig. 7 Vibration FFT spectra at the UVRW stage of CB1 before and after movement in the x- and y-directions, respectively

특성은 구조적 유사성 때문에 진동 특성도 비슷한 양상을 보이는 데, Fig. 7과 Fig. 8로부터 moving 전/후로 약 20 Hz 대역까지 변위 진동이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 설비의 물류 이동에 따라 CB1에서 약 15배($2 \mu\text{m rms} \rightarrow 30 \mu\text{m rms}$), CB3에서는 최대 약 5배($12 \mu\text{m rms} \rightarrow 60 \mu\text{m rms}$)의 진동 증가가 발생함을 의미한다.

한편, Fig. 7 & Fig. 8에서 모두 존재하는 60 Hz 성분은 전기

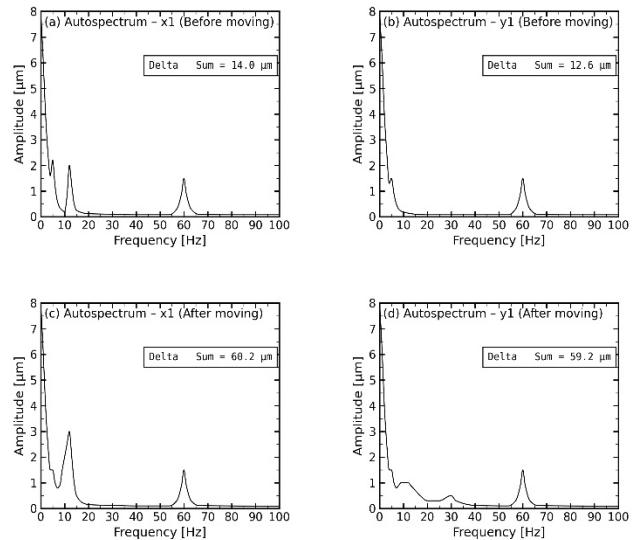


Fig. 8 Vibration FFT spectra at the UVRW stage of CB3 before and after movement in the x- and y-directions, respectively

노이즈 성분으로 설비가 조립 후 구동 테스트 중이라 전기 접지 부족에서 기인한 것으로 판단된다.

현재 모든 측정 지점의 진동 수준이 카메라 FOV 스펙 대비 90% 이상의 마진을 확보한 상태이므로 설비 운용 적합성에 실질적 영향은 없으나, 향후 카메라 해상도 고도화나 조립 정밀도 요구 수준이 높아질 경우를 대비하여 modal test를 통한 정밀한 동특성 분석이 반드시 필요하다.

4. 결론

본 연구에서는 IT LMS 혁신 LAMI 설비에 대해 B&K VIBRO 계측 시스템을 활용하여 진동 및 소음을 정량적으로 진단하고, 카메라 FOV 스펙을 기반으로 한 진동 허용 기준을 제안하였다. No Moving 상태에서 모든 측정 지점의 진동 변위는 카메라 FOV 스펙($106 \mu\text{m rms}$)의 10% 미만(최대 $4.98 \mu\text{m rms}$)으로 정밀 광학 검사에 적합한 수준임을 확인하였다.

UVRW 스테이지의 Moving 상태에서 스테이지 자체의 절대 진동량은 CB1에서 최대 15배($2 \rightarrow 30 \mu\text{m rms}$), CB3에서 최대 5배($12 \rightarrow 60 \mu\text{m rms}$) 증가하였으나, 카메라 마운트 구조물에서의 진동은 모든 지점에서 FOV 스펙 대비 90% 이상의 마진을 유지하였다. 주파수 특성은 20 Hz 이하 저주파 대역이 진동의 주요 성분이었으며, CB1에서는 구조적 특성에 의한 20~40 Hz 대역 성분이 추가로 관측되었다. 소음은 최대 68.7 dB(A)로 정지 상태 대비 약 1 dB(A) 증가에 그쳐, 설치 예정지 소음 규정(85 dB(A)) 대비 약 16 dB(A)의 여유를 확보하였다. 두 카메라 간 상대 진동은 $1 \mu\text{m rms}$ 미만으로 균일하였고, rail부 진동은 $1.3 \mu\text{m rms}$

이하로 매우 낮아 정밀 광학 검사에 적합한 환경임을 확인하였다.
향후 카메라 해상도 또는 설비의 Lamination 정밀도 요구 수준이 높아질 경우를 대비하여, impact hammer test 기반 modal analysis를 통한 구조 동특성 규명과 UVRW 스테이지 이송 중 발생하는 저주파 진동의 능동 저감 방안 연구가 필요하다.

References

- [1] ISO, 2013, Acoustics - Estimation of Noise-Induced Hearing Loss, ISO 1999:2013, 3rd ed., International Organization for Standardization, Geneva.
- [2] Bai, C., 2011, Machinery Fault Diagnosis and Signal Processing, Prentice Hall.
- [3] Gordon, C. G., 1992, Generic Criteria for Vibration-Sensitive Equipment, Proceedings of SPIE, 1619 71-85, <https://doi.org/10.1117/12.56826>
- [4] Jung, D. I., Ku, B. Y., 2019, Comparative Study of Piezoelectric and MEMS Accelerometers for Vibrational Measurements, J. Korean Soc. Nondestruct. Test., 39:3 168-175, <https://doi.org/10.7779/JKSNT.2019.39.3.168>
- [5] Jeon, S. C., Shin, E. S., 2024, Vibration Isolator with Quasi-Zero Stiffness Characteristics and High Load-Carrying Capacity, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 33:1 18-26, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2024.33.1.18>.
- [6] Mobius Institute, 2017, Vibration Analyst Category IV (VCAT-IV) Course Materials, ISO 18436-2 Category IV Training, <<https://www.mobiusinstitute.com>>.



Dong Jin Lee

Professor in the Department of Semiconductor Equipment Development, Korea Polytechnics. His research interests include diagnosis of semiconductor manufacturing equipment, with a focus on sound and vibration analysis.
E-mail: djvibra@kopo.ac.kr