

연구장비성능평가 절차서: PE-AFM-001-2026

**원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및
좌표축 직교성 성능 평가 절차서**

**– Test procedure for scanner displacement deviations and
coordinate orthogonality using an atomic force microscope
(AFM) –**

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

☐ 절차서 담당부서 : 소재물성측정그룹

☐ 절차서 작성자 : 신채호

☐ 제·개정 이력 내역

구분	제·개정번호	최종 개정·확인 일자	제·개정 내용 요약
제정	01	2026. 08. 11	ISO/IEC 17025:2017의 요건에 따라 제정

☐ 절차서 목차

1. 적용범위	2
2. 인용표준	2
3. 용어의 정의	3
4. 시험내용	11
5. 준비사항	20
6. 소요장비 명세	22
7. 시험방법	24
8. 평가불확도 산정	35
9. 평가결과서 작성방법	57
10. 유효성 검증방법	48
[별첨 1] 연구장비성능평가 결과서 예시	49
[별첨 2] 연구장비성능평가 결과서 표지 예시	54

	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

1. 적용범위

이 절차서는 원자힘 현미경(Atomic Force Microscope: AFM) 장비의 스캐너 구동 편차(Displacement deviations) 및 좌표축 직교성(Orthogonality) 성능 평가에 적용한다.

2. 인용표준

- 2.1 ISO/IEC Guide 98-3, Guide to the expression of uncertainty in measurement (측정불확도 표현 지침), 2008.
- 2.2 KRIS/SP-2010-105, KRIS guide to the expression of uncertainty in measurement (KRIS 측정불확도 표현 지침), 2011.
- 2.3 ISO 11952, Surface chemical analysis-scanning probe microscopy-determination of geometric quantities using SPM:calibration of measuring systems, 2019.
- 2.4 ISO/IEC 17025, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, 2017
- 2.5 KRIS-SP-2008-022, Internal vocabulary of metrology - basic and general concepts and associated terms (국제 측정학 용어집 - 기본 및 일반 개념과 관련 용어), 2008.
- 2.6 ISO 5436-1, Geometrical product specifications (GPS) - surface texture: profile method; measurement standards- part 1: material measures, 2000.
- 2.7 ISO 25178-601, Geometrical product specifications (GPS) - surface texture: profile method-nominal characteristics of contact(stylus) instruments technical corrigendum 1, 2025.
- 2.8 ISO 12179, Geometrical product specifications (GPS) - surface texture: profile method; calibration of contact (stylus) instruments, 2026.
- 2.9 ISO 21920-2, Geometrical product specifications (GPS) - surface texture: profile method-terms, definitions and surface texture parameters, 2021.
- 2.10 ISO 21920-3, Geometrical product specifications (GPS) - surface texture: profile method-rules and procedures for the assessment of surface texture technical corrigendum, 2021.
- 2.11 IEC/TS 62622, Artificial gratings used in nanotechnology — description and measurement of dimensional quality parameters, 2012

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

3. 용어의 정의

: 이 절차서에서 사용하는 용어 및 정의는 ISO 11952, ISO 18115-2, IEC/TS 62622 및 관련된 측정 불확도 표현 지침에 따른다.

- 스캐너 휨(scanner bow): xy 방향 스캔 시 발생하는 비의도적인 z 방향 변위.
- 보정 참조표(look-up table): 스캐너의 운전 조건별 보정계수를 저장한 표.
- 단차 높이(step height): 표면 돌출부의 높이 또는 홈의 깊이.
- 수평화(levelling): 시편면과 스캔 평면 사이의 기울기를 보정하는 과정.
- 프로브(tip): 팁을 이용하여 시편 표면과의 국소 상호작용을 검출하는 구성요소.
- 위치 검출기(position detector): 프로브의 휨 또는 진동 변화를 전기 신호로 변환하는 장치.
- 시편 홀더(specimen holder): 측정 시편을 고정하고 필요한 경우 위치를 조절하는 장치.

3.1 원자힘 현미경 (Atomic Force Microscope, AFM)

원자힘현미경은 탐침과 시료 표면 사이에 작용하는 원자 간 또는 분자 간 힘을 검출하여 시료 표면의 형상 및 물리적 특성을 측정하는 주사탐침현미경 (Scanning Probe Microscope, SPM)의 한 종류이다. 탐침과 시료 사이의 상대적인 xy 방향 이송과 z 방향 변위를 이용하여 시료 표면의 3차원 형상 정보를 획득한다 (그림 1).

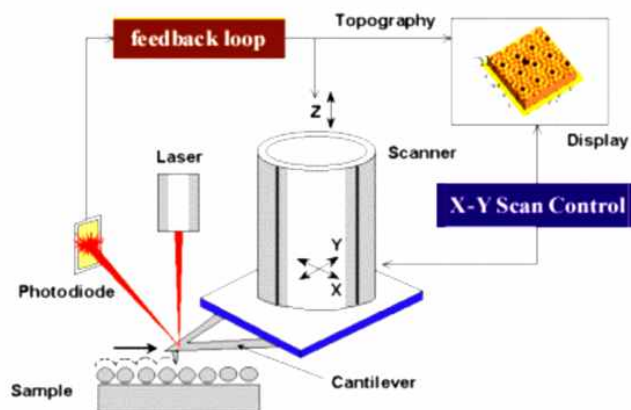
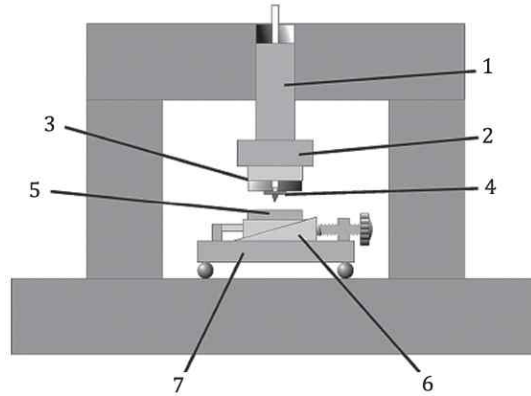


그림 1. AFM의 측정 원리

국제적인 ISO 18115-2에서 AFM의 구성 요소는 크게 탐침(Probe), 위치감지기(Position detector), z-스캐너(z-scanner), xy-스캐너(x-y-scanner), 표면 홀더로 되어 있다 (그림 2).

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02



- Key
- 1 x-y-scanner
 - 2 z-scanner
 - 3 position detector
 - 4 probe
 - 5 specimen
 - 6 coarse z-approach, i.e. move the probe or the specimen in the vertical direction to bring it close enough to the specimen or probe, respectively (afterwards, start automatic approach techniques)
 - 7 coarse x-y-positioning, i.e. move the specimen or probe laterally close to or into the region of interest on the specimen

그림 2. AFM의 구성 요소

3.2 스캐너 (Scanner)

스캐너는 탐침 또는 시료를 x, y 및 z 방향으로 정밀하게 이동시키는 AFM의 구동 장치이다. 일반적으로 압전소자(piezoelectric element)를 사용하며, xy 스캐너는 수평 방향의 주사 운동 (raster scanning)을, z 스캐너는 수직 방향의 변위 제어를 수행한다.

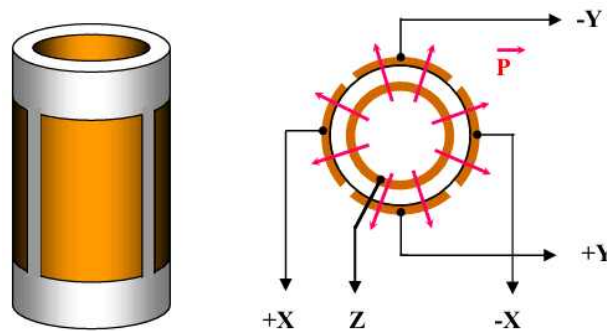


그림 3. AFM의 Tube scanner

3.3 xy 스캐너 (xy Scanner)

xy 스캐너는 탐침과 시료 사이의 상대 위치를 수평면의 x축 및 y축 방향으로 이동시키는 장치이다. xy 스캐너의 변위 특성은 측정된 구조물의 길이, 간격, 피치 및 형상 정확도에 직접적인 영향을 미친다.

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

3.4 스캔 범위 (Scan Range)

스캔 범위는 고정된 측정조건에서 스캐너만을 이용해 구동할 수 있는 x축, y축, 및 z축 방향으로의 최대 이송/변위 제어 범위를 의미한다. 스캔 범위는 사용되는 스캐너, 구동 전압, 측정 속도 및 피드백 조건에 따라 달라질 수 있다.

3.5 스캐너 구동 편차 (Scanner Displacement Deviation)

스캐너 구동 편차는 xy축 이송 편차와 z축 변위 편차로 구성되며, 스캐너의 이송/변위 설정값과 교정된 형상치수 기준물 (Dimensional standard)을 이용하여 얻은 실제 변위 사이의 차이를 의미한다. 이 편차에는 스캐너의 비선형성, 히스테리시스, 크리프 및 축 간 교차 간섭 등에 의한 영향이 포함될 수 있다.

3.6 스캐너 구동 정확도 (Scanner Displacement Accuracy)

스캐너 구동 정확도는 스캐너에 설정된 변위가 기준값 또는 인증값에 얼마나 근접하게 구현되는지를 나타내는 성능 특성이다. 일반적으로 측정표준의 인증값과 AFM 측정값의 차이 또는 상대편차를 이용하여 평가한다.

3.7 보정계수 (Correction Factor)

교정계수는 스캐너의 지시값을 길이 단위에 소급되는 실제 변위값으로 보정하기 위해 곱해주는 ‘무차원 단위’ 수치이다. x축, y축 및 z축의 교정계수는 각각 C_x , C_y 및 C_z 로 표시할 수 있다.

3.8 피치 또는 주기 (Pitch or Period)

피치 또는 주기는 격자 기준물에서 동일한 형상을 갖는 인접 구조물의 대응 위치 사이의 거리를 의미한다. x방향과 y방향의 피치는 각각 p_x 및 p_y 로 표시하며, xy스캐너의 변위 교정에 사용한다.

3.9 격자 기준물 (Lateral Grating Standard)

격자 기준은 일정한 피치 또는 주기를 갖는 1차원 또는 2차원 반복 구조로 구성된 수평축 (xy-축) 길이 측정표준이다. 인증된 피치값을 AFM으로 측정한 값과 비교하여 xy 스캐너의 보정계수, 구동 편차 및 좌표축 직교성을 평가하는 데 사용한다.

KRIS	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

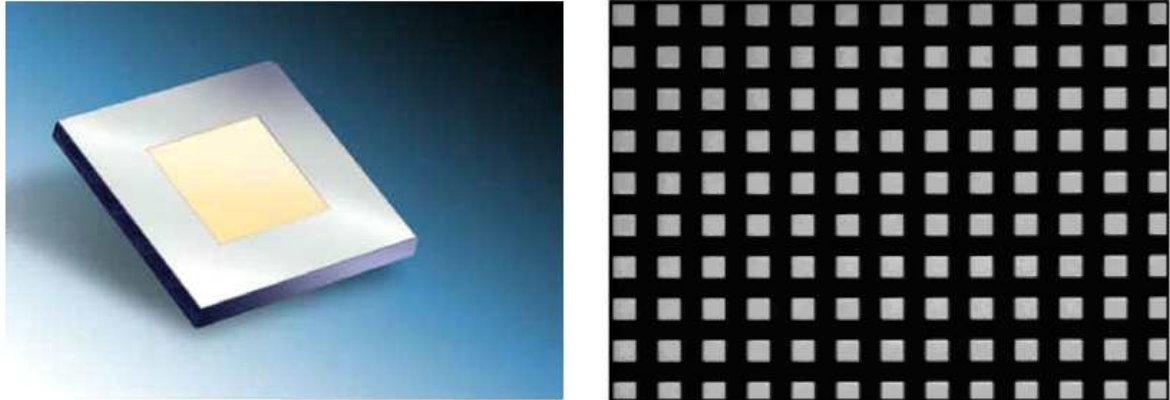


그림 4. Platinum으로 코팅된 AFM용 스캐너 교정 물질 (미국 VLSI 제공)

3.10 직교성 (Orthogonality)

직교성은 xy 스캐너의 평면 좌표계 상에서 x축 이송과 y축 이송이 이상적인 직각 관계를 유지하는 정도를 의미한다. 두 축의 이송을 통해 실제 측정이 구현되는 방향 간의 각도가 90° 에서 벗어난 정도를 직교성 편차 또는 비직교성으로 평가한다.

3.11 비직교성 (Non-orthogonality)

비직교성은 xy스캐너의 x축과 y축 사이의 실제 각도가 이상적인 직각인 90° 에서 벗어난 정도를 의미한다. 이차원 격자 표준의 두 격자 벡터 사이의 각도를 측정하여 계산하며, 기호 γ_{xy} 로 나타낼 수 있다.

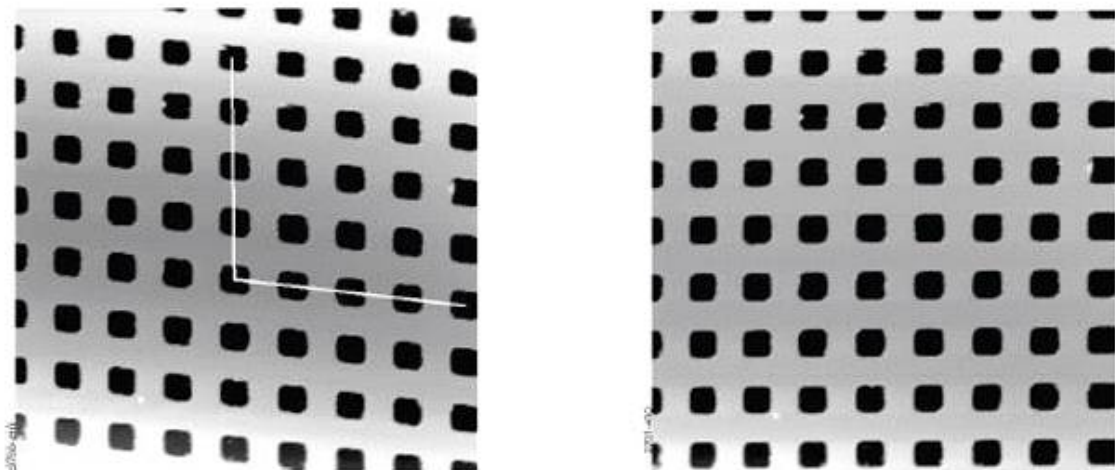


그림 5. xy 스캐너로 인한 비직교성(왼쪽)과 보정된 직교성(오른쪽) 이미지

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

3.12 격자 벡터 (Grating Vector)

격자 벡터는 2차원 격자 기준물에서 반복 구조의 방향과 주기를 나타내는 벡터이다. x방향과 y방향의 격자 벡터는 각각 $\vec{a}_x$ 및 $\vec{a}_y$ 로 나타내며, 두 벡터 사이의 각도를 이용하여 스캐너의 직교성을 평가한다.

3.13 스캐너 비선형성 (Scanner Nonlinearity)

스캐너 비선형성은 스캐너에 인가되는 구동 신호와 실제 발생한 변위 사이의 관계가 이상적인 선형 관계에서 벗어나는 현상을 의미한다. 비선형성은 스캔 위치와 스캔 범위에 따라 다르게 나타날 수 있다.

3.14 히스테리시스 (Hysteresis)

히스테리시스는 동일한 구동 신호가 인가되더라도 스캐너의 이동 방향 또는 이전 구동 이력에 따라 서로 다른 변위가 발생하는 현상을 의미한다. 일반적으로 정방향과 역방향 스캔에서 측정된 위치 또는 길이의 차이로 평가할 수 있다.

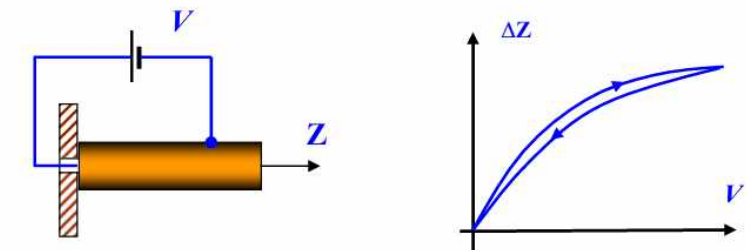


그림 6. Voltage에 따른 z scanner의 히스테리시스 현상

3.15 크리프 (Creep)

크리프는 스캐너의 구동 전압이 급격하게 변경된 후에도 스캐너의 변위가 즉시 안정화되지 않고 시간에 따라 추가로 변화하는 현상을 의미한다. 크리프는 스캔 시작 직후 측정된 이미지의 변형이나 위치 오차를 발생시킬 수 있다.

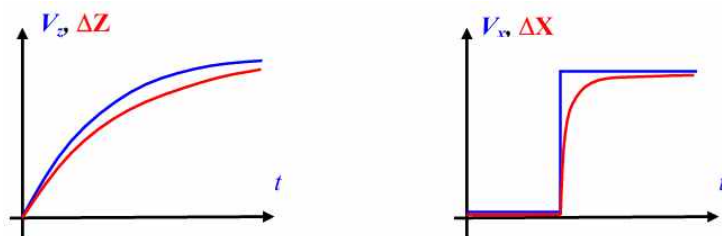


그림 7. Voltage에 따른 스캐너의 크리프 현상

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

3.16 드리프트 (Drift)

드리프트는 일정한 측정조건에서도 시간 경과에 따라 탐침과 시료 사이의 상대 위치가 점진적으로 변하는 현상을 의미한다. 주로 장비의 열적 안정성, 주변 온도변화 및 기계적 안정성의 영향을 받는다.

3.17 축 간 교차 간섭 (Cross-talk)

축 간 교차 간섭은 한 축의 스캐너를 구동할 때 의도하지 않은 다른 축 방향의 변위가 동시에 발생하는 현상을 의미한다. 예를 들어 x축 구동에 의해 y축 또는 z축 방향의 추가 변위가 발생할 수 있다.

3.18 스캐너 휨 (Scanner Bow)

스캐너 휨은 xy방향으로 스캐너가 이동할 때 발생하는 의도하지 않은 z방향의 추가 변위를 의미한다. 스캐너 휨은 평면 밖 운동(out-of-plane motion)이라고도 하며, 평평한 시료를 측정할 때 곡면 형태의 배경 신호로 나타날 수 있다.

3.19 수평화 (Leveling)

수평화는 이상적인 시료의 이상적인 xy 평면과 AFM 스캔 평면 사이에 존재할 수 있는 기울기 정렬오차를 단순 보정하는 측정 데이터 전처리 과정이다. 수평화 과정이 실제 스캐너의 휨, 비선형성 또는 측정 대상 구조를 훼손하지 않도록 ‘수평화’ 보정함수의 차수와 적용 영역을 적절히 선택하여야 한다.

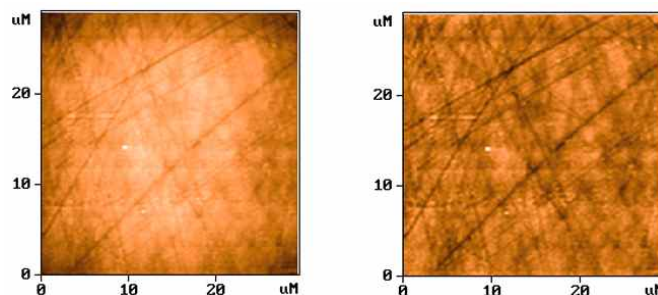


그림 8. 표면 측정 시 스캐너 휨 현상 발생(왼쪽), 평면화 진행된 이미지 (오른쪽)

3.20 룩업 테이블 (Look-up Table)

룩업 테이블은 스캔 범위, 스캔 속도, 구동 방향 및 스캐너 위치 등 다양한 작동 조건에 따른 스캐너 보정 계수를 저장한 표이다. AFM 제어 시스템은 룩업 테이블을 이용하여 스캐너의 비선형성 및 위치 의존적 편차를 보정할 수 있다.

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

3.21 무게중심법 (Centre-of-gravity Method)

무게중심법은 측정된 격자 구조의 AFM 이미지 신호 공간분포로부터 각 격자점의 중심좌표를 계산하고, 인접한 격자점/격자선 중심좌표 사이의 거리를 이용하여 격자 피치 또는 스캐너 변위를 산출하는 방법이다.

3.22 교차상관법 (Cross-correlation Method)

교차상관법은 기준 격자 단위 셀과 전체 측정 이미지 사이의 상관관계를 계산하여 반복 구조의 위치와 피치를 결정하는 방법이다. 일반적으로 푸리에 변환을 기반으로 계산하며, 상관 피크의 위치 또는 무게중심을 이용하여 격자 간격을 산출한다.

3.23 측정소급성 (Metrological Traceability)

측정소급성은 측정 결과가 각각 측정불확도가 명시된 끊어지지 않는 교정의 연쇄를 통하여 국가측정표준 또는 국제측정표준과 관련될 수 있는 성질을 의미한다.

3.24 측정불확도 (Measurement Uncertainty)

측정불확도는 측정 결과에 관련하여 측정량에 합리적으로 귀속될 수 있는 값의 측정학적 분산 특성을 나타내는 음이 아닌 매개변수이다. AFM 스캐너 교정에서는 측정표준의 인증값, 측정 반복성, 이미지 분석, 환경 변화, 드리프트 및 교정계수 등의 영향을 포함하여 평가한다.

3.25 인증표준물질 (Certified Reference Material, CRM)

인증표준물질은 하나 이상의 특성값이 측정학적으로 유효한 절차에 따라 결정되고, 해당 특성값과 측정불확도 및 측정소급성이 인증서에 명시된 표준물질이다. AFM 스캐너 교정에서는 인증된 피치 또는 단차값을 갖는 형상치수 표준물 (Dimensional Standard)을 사용할 수 있다.

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02



Surface Topography Standards

STAY ON TOP OF 3D PROBE CALIBRATION. The Surface Topography Standard (STS) uses a combination of step height and pitch to enable three-dimensional calibration of optical Interferometric microscopes and AFMs. Multiple pitch gratings take calibration further, allowing characterization of scan linearity. On high resolution tools such as the Atomic Force Microscope, traceability to SI units through NIST calibration can be achieved, driving your equipment to its full potential.

The Surface Topography Standard, shown at right, consists of an etched silicon dioxide "waffle pattern" on a silicon substrate.



PRODUCT SPECIFICATIONS

- Dimensions**
 12 mm x 8 mm silicon die
- Materials**
 Silicon Dioxide on Silicon coated with Platinum (except STS2-1000S & STS2-1800S models)
- Nominal Pitch Values (X and Y)**
 STS2: 1.8 μm , 3 μm , and 5 μm (all on one standard)

 STS3: 3 μm , 10 μm , and 20 μm (all on one standard)
- Nominal Height Values (Z)**
 18 nm, 44 nm, 100 nm, 180 nm
- Traceability**
 Traceable to SI units through NIST

PRODUCT DESCRIPTION

The Surface Topography Standard consists of a 12 mm x 8 mm silicon die with a pitch cluster patterned in a layer of silicon dioxide. The pitch cluster contains three distinct grid patterns. Each grid pattern measures approximately 270 μm x 270 μm and consists of an array of alternating bars and spaces with an extremely uniform pitch in both the X and Y direction. Two models are available: the STS2 has pitches of 1.8 μm , 3 μm , and 5 μm ; the STS3 has pitches of 3 μm , 10 μm , and 20 μm . Each model is available with vertical step heights of either 18 nm, 44 nm, 100 nm or 180 nm. Our precise manufacturing technique ensures a very regular topographic pattern, allowing accurate measurement across the entire working area of the standard.

그림 9. AFM 단차 교정을 위한 소급성 (NIST-traceable) 단차 형상치수 표준물
(미국 VLSI 제공)

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

4. 시험내용

본 시험은 AFM 장비의 주요 성능지표인 스캐너 평가를 위한 환경 영향성 및 측정 방법을 다음과 같이 정의한다.

4.1 환경 영향성 정량화

AFM 측정 결과는 장비 자체의 특성뿐만 아니라 온도, 습도, 공기 흐름, 기계적·음향적 진동 및 전자기적 간섭 등의 영향을 받을 수 있다. 따라서 본 성능평가에서는 스캐너 교정 수행에 앞서 측정환경과 장비 운용조건에 따른 영향을 정량적으로 평가하고, 안정적인 측정이 가능한 환경조건과 대기시간을 설정한다.

환경 영향성 평가는 다음의 다섯 항목을 중심으로 수행한다.

- 4.1.1 장비 가동 후 안정화에 필요한 대기시간
- 4.1.2 시료 또는 탐침 교체 후 안정화에 필요한 대기시간
- 4.1.3 온도, 습도, 공기 흐름, 진동 및 전자기적 간섭의 영향
- 4.1.4 장비의 정적·동적 노이즈 및 축 간 교차 간섭
- 4.1.5 반복 측정을 통한 장기 안정성 및 재현성

4.1.1 장비 가동 후 대기시간

AFM의 전원을 켜 직후에는 전자장치의 예열, 스캐너의 열팽창 및 압전소자의 크리프 등에 의해 측정값이 시간에 따라 변할 수 있다. 따라서 장비 가동 후 일정한 시간 간격으로 동일한 시료 영역을 반복 측정하고, 측정된 구조물의 위치, 피치 또는 평균 높이의 변화를 확인한다. 전자장치의 예열에는 최소 30분 이상의 시간이 필요할 수 있으며, 장비의 설치 또는 이동 후에는 주변 환경과 충분히 열적 평형을 이루도록 별도의 안정화 시간을 부여한다. 장비의 안정화 여부는 시간에 따른 측정값의 변화율을 기준으로 평가한다. ISO 11952:2019에 따라 90 μm 의 스캔 범위에서 P-V (Peak-to-Valley) 값이 10 nm 이하인 평탄한 시편을 사용하여 동일한 스캔 범위 및 스캔 속도 조건에서 반복 측정한다. 측정값의 시간당 변화율을 산출하고, 해당 변화율이 사전에 설정한 허용기준인 최대 20% 이하로 감소한 시점을 장비의 안정화 완료 시점으로 판단한다.

수평면 드리프트 속도는 식(1)과 같이 계산할 수 있다.

$$v_{d,x} = \frac{\Delta x}{\Delta t}, \quad v_{d,y} = \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (1)$$

여기서, Δx 와 Δy 는 시간 간격 Δt 동안 측정된 특징점의 상대적인 위치 변화량이다.

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

4.1.2 시료 또는 탐침 교체 후 대기시간

시료 또는 탐침을 교체하거나 시료 위치, 스캔 크기 및 스캐너 중심위치를 크게 변경한 경우에는 기계적 응력, 열적 변화 및 압전 크리프가 발생할 수 있다. 이러한 영향이 충분히 감소하기 전에 측정하면 이미지의 늘어남, 압축 또는 위치 이동이 발생할 수 있다.

시료 또는 탐침 교체 후 동일한 영역을 연속 측정하고, 연속 이미지 간의 특징점 이동량 또는 교차상관 피크의 이동량을 계산한다. 위치 변화량과 피치 측정값이 일정 범위에서 안정적으로 유지되는 시간을 확인하여 최소 대기시간으로 설정한다.

4.1.3 온도 및 상대습도의 영향

AFM의 구조물, 시료 홀더 및 격자 표준은 온도변화에 따라 열팽창하거나 수축할 수 있다. 또한 상대습도의 변화는 탐침-시료 사이의 모세 관력과 표면 상호작용에 영향을 줄 수 있다.

측정 중 온도와 상대습도를 일정한 시간 간격으로 기록하고, 동일한 격자 표준의 피치 또는 단차를 반복 측정한다. 온도 및 상대습도 변화와 측정값 사이의 상관성을 분석하여 환경 민감도를 평가한다.

온도에 따른 측정값의 변화는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S_T = \frac{\Delta M}{\Delta T} \quad (2)$$

여기서 S_T 는 온도 민감도, ΔM 은 피치 또는 단차 측정값의 변화량, ΔT 는 온도 변화량이다.

격자 표준의 인증값이 기준온도 (23 ± 0.1) °C에서 제시된 경우에는 시료의 열팽창계수를 고려하여 측정온도에 따른 피치값을 보정할 수 있다.

4.1.4 장비 노이즈 및 교차 간섭

기계적 진동, 주변 소음, 작업자의 이동 및 공조 장치에 의한 공기 흐름은 AFM 이미지에 줄무늬, 반복적인 높이 변화 또는 위치 흔들림을 발생시킬 수 있다. 진동의 영향을 확인하기 위해 평탄도 표준 또는 표면거칠기가 충분히 작은 평평한 시편을 측정한다. 능동 제진대와 방음 덮개의 작동 전후에 동일한 조건으로 반복 측정하고 다음 결과를 비교한다.

- 높이 방향 RMS 노이즈 R_{qz} 또는 S_{qz}
- 최대-최소 높이값 (P-V)
- 연속 스캔 라인의 차이
- 반복 이미지 간의 상대 위치 변화
- 이미지에 나타나는 주기적인 진동 성분

외부 진동 영향은 능동 제진대와 방음 덮개를 사용하여 최소화한다. 다만 방음 덮개 내부의 온도 상승이 열적 드리프트를 유발할 수 있으므로 덮개 내부의 온도변화도 함께 확인한다.

또한, 장비 노이즈는 정적 노이즈와 동적 노이즈로 구분하여 평가한다. 정적 노이즈는 xy스캐

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

너의 이동을 정지한 상태에서 평평한 시편의 높이 신호를 일정 시간 측정하여 평가한다. 동적 노이즈는 x 또는 y 축방향으로 스캔하면서 연속된 두 개 이상의 스캔 라인을 비교하여 평가한다. 노이즈는 식(3)과 같이 높이 신호의 RMS값 또는 표준편차로 나타낼 수 있다.

$$R_{qz} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_i - \bar{z})^2} \quad (3)$$

축 간 교차 간섭은 한 축을 구동할 때 다른 축에서 발생하는 의도하지 않은 변위를 의미한다. 평탄도 표준 또는 평면 격자 표준물을 이용하여 ‘x축 구동에 따른 y축 및 z축 좌표 신호 변화’와 더불어 ‘y축 구동에 따른 x축 및 z축 좌표 신호’ 변화를 평가한다.

4.1.5 장기 안정성

동일한 시료와 측정조건에서 일정한 시간 또는 날짜 간격으로 반복 측정을 수행하여 장비의 장기 안정성을 평가한다. 평가항목은 xy방향 피치, z방향 단차, 교정계수 및 직교성 편차로 한다. 측정값의 평균, 표준 편차 및 변동계수를 산출하고, 측정 기간에 따른 체계적인 변화가 나타나는지 확인한다.

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \times 100 \quad (4)$$

CV(Coefficient of variation, CV)로 변동계수로 반복 측정값의 산포가 평균값에 비해 어느 정도 인지 나타내는 상대적인 지표를 나타낸다. s는 반복 측정값의 표준편차를 의미하고, $\bar{x}$ 는 반복 측정값의 산술평균 값을 의미한다. 환경 영향성 평가 결과를 바탕으로 장비 예열시간, 탐침·시료 교체 후 대기시간, 허용 온·습도 범위, 제진·방음 조건 및 작업자의 행동 기준을 측정 절차에 반영한다.

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

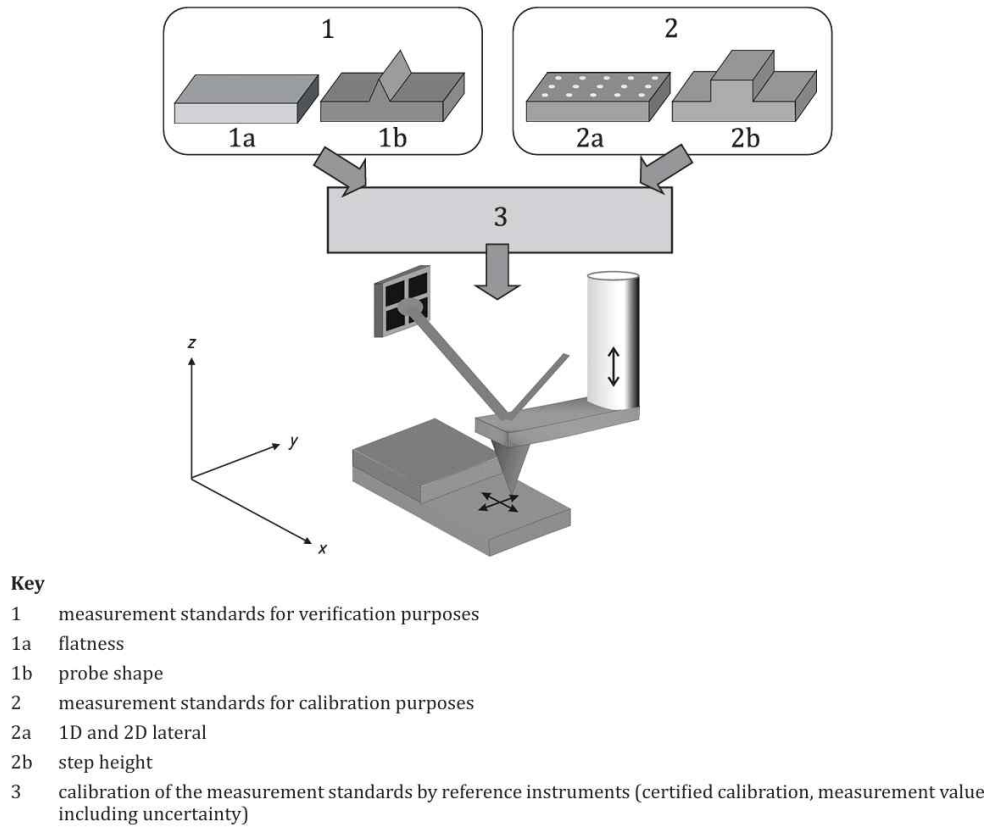


그림 10. 1D, 2D 시편을 통한 AFM 장비 평가 진행 방법

4.2 xy스캐너 구동 편차 및 직교성 평가

xy스캐너의 구동 편차 및 직교성은 인증된 피치값을 갖는 일차원 또는 이차원 측면 격자 기준물을 이용하여 평가한다. 측면 격자 기준물의 형상, 피치, 방향 및 품질 특성은 IEC/TS 62622에 따라 확인한다.

측정에는 표준시편의 인증값, 측정불확도 및 측정소급성이 명시된 격자 기준을 사용한다. 1차원 격자 기준을 사용할 때에는 x축 측정 후 시편을 90° 회전하여 y축을 측정한다. 직교성을 평가할 때에는 두 방향의 격자 벡터를 동시에 측정할 수 있는 이차원 격자 기준물을 사용한다.

4.2.1 측정조건 설정

격자 표준은 오염, 마모 및 구조적 결함이 없는 영역에서 측정한다. 측정 이미지는 각 방향으로 5개 이상의 반복 구조가 포함되도록 하고, 구조물 한 주기당 10개 이상의 픽셀이 포함되도록 스캔 범위와 해상도를 설정한다. 푸리에 변환 기반 분석에서는 격자 주기의 수는 스캔 영역에서 최대화 되도록 측정 범위를 설정한다.

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

다음 측정조건을 기록한다.

- 격자 표준의 명칭, 일련번호 및 인증값
- 스캔 크기와 픽셀 수
- 스캔 속도 또는 라인 주파수
- 정방향 및 역방향 스캔
- 스캔 각도
- 피드백 이득과 설정값
- 페루프 제어 및 보정 기능의 적용 여부
- 분석 프로그램과 적용 알고리즘

스캔 속도와 스캔 범위는 압전 스캐너의 동적 비선형성과 이미지 왜곡에 영향을 줄 수 있으므로 실제 측정에 일반적으로 사용하는 조건을 기본조건으로 설정한다. 필요한 경우 서로 다른 스캔 속도와 스캔 범위에서 추가 측정을 수행한다.

4.2.2 xy스캐너 구동 편차

xy스캐너의 구동 편차는 격자 표준의 인증 피치값과 AFM으로 측정한 피치값의 차이로 평가한다. x축과 y축 방향의 절대편차 및 상대편차는 다음과 같이 계산한다. 식(5)와 같이, 절대편차는 AFM으로 측정한 피치값과 격자 표준의 인증 피치값의 사이의 차이를 나타낸다. 상대편차는 식(6)과 같이 절대편차를 인증값으로 나누어 기준 길이에 비해 어느정도의 비율로 편차가 발생했는지 나타내는 값을 말한다.

$$\Delta p_x = p_{x,meas} - p_{x,ref} \quad (5)$$

$$\Delta p_y = p_{y,meas} - p_{y,ref}$$

$$\delta p_x = \frac{p_{x,meas} - p_{x,ref}}{p_{x,ref}} \times 100 \quad (6)$$

$$\delta p_y = \frac{p_{y,meas} - p_{y,ref}}{p_{y,ref}} \times 100$$

여기서 p_{ref} 는 격자 표준의 인증 피치값이고, p_{meas} 는 AFM으로 측정한 평균 피치값이다. xy스캐너 보정계수는 식(7)과 같이 계산할 수 있다.

$$c_x = \frac{p_{x,ref}}{p_{x,meas}}, \quad c_y = \frac{p_{y,ref}}{p_{y,meas}} \quad (7)$$

보정계수를 적용한 후 동일한 조건에서 격자 기준을 다시 측정하여 잔류편차를 확인한다.

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

4.2.3 무게중심법

무게중심법은 측정된 격자 구조의 높이 또는 신호 분포로부터 각 격자 기준물의 격자 특징점의 중심좌표를 결정하고, 중심좌표 사이의 거리를 이용하여 격자 피치를 산출하는 방법이다.

분석 절차는 다음과 같다.

- 측정 이미지에서 반복되는 격자 구조를 구분한다.
- 각 격자 구조의 x축 및 y축 무게중심 좌표를 계산한다.
- 2차원 격자점 중심좌표 행렬 내의 동일한 행 또는 열의 중심좌표에 최소제곱 회귀선을 적용한다.
- 서로 평행한 두 회귀선 사이의 수직 거리를 계산하면 개별 선간 거리가 구해진다.
- 여러 주기에 걸친 선간 거리를 주기 수로 나누어 평균 피치를 산출한다.

단일 인접 구조물 사이의 거리보다 여러 개의 격자 주기를 포함하는 거리를 이용하면 국소적인 형상 편차와 중심좌표 결정 오차의 영향을 줄일 수 있다. 그림 11의 예와 같이 6개 주기에 해당하는 거리 S_6 등을 이용하여 평균 피치를 계산할 수 있다. 무게중심법은 개별 구조물의 중심을 직접 계산할 수 있다는 장점이 있지만, 이미지 노이즈, 표면거칠기, 구조물 형상 및 분할 임계값의 영향을 받을 수 있다. 분할 임계값 (segmentation threshold)은 구조물로 인식되는 픽셀 영역 경계를 나타내기 때문에, 임계값 설정에 따라 산출된 중심좌표와 피치값에 편차가 발생할 수 있다.

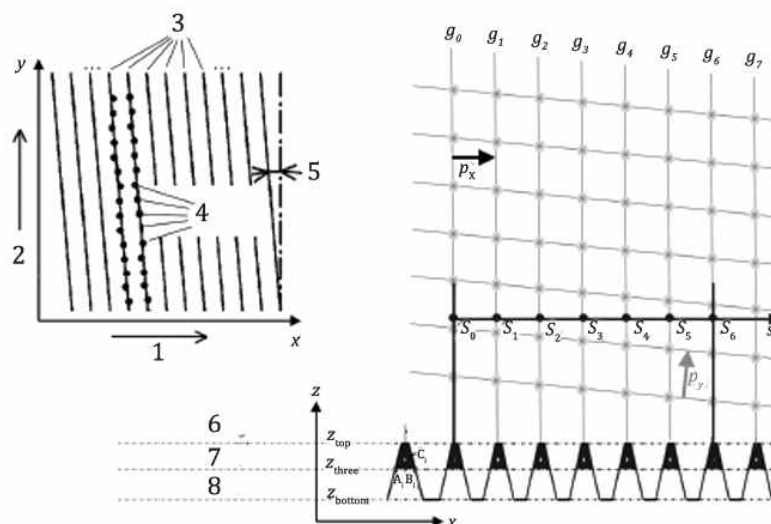


그림 11. 무게 중심법을 이용한 2차원 평면 격자 기준물 ‘평균’ 피치 측정 방법
(보통 6배의 격자 주기 적용, S_6)

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

4.2.4 교차상관법

교차상관법은 측정 이미지에서 선택한 격자 단위 셀과 전체 이미지 사이의 상관관계를 계산하여 반복 구조의 위치를 결정하는 방법이다. 계산 효율을 높이기 위해 푸리에 변환을 이용할 수 있다. 분석 절차는 다음과 같다.

- 전체 격자 이미지에서 대표적인 단위 셀을 선택한다.
- 단위 셀과 전체 이미지의 교차상관을 계산한다.
- 각 격자 위치에 대응하는 상관 피크를 검출한다.
- 각 상관 피크의 무게중심 좌표를 계산한다.
- 피크 사이의 x축 및 y축 간격으로부터 평균 피치를 산출한다.
- 인증 피치값과 비교하여 교정계수와 구동 편차를 계산한다.

교차상관법은 AFM 이미지로 취득된 격자 구조물 ‘전체 공간 정보’를 이용하므로 국소적인 잡음에 상대적으로 강인하다. 다만, 단위 셀 선택, 이미지 경계, 창 함수, 픽셀 분해능 및 피크 보간방법이 결과에 영향을 줄 수 있으므로 분석조건을 기록하여야 한다.

4.2.5 직교성 평가

직교성은 이차원 격자 표준의 두 격자 벡터 사이의 각도를 이용하여 평가한다. 각 격자 방향의 중심좌표에 회귀선을 적용하거나 푸리에 공간에서 두 격자 벡터를 결정한 후 두 벡터 사이의 측정각 θ_{xy} 를 계산한다.

스캐너의 비직교성은 식(8)과 같이 계산한다.

$$\gamma_{xy} = \theta_{xy} - \theta_{ref} \quad (8)$$

기준 격자의 인증각이 이상적인 직각인 경우에는 다음과 같이 나타낸다.

$$\gamma_{xy} = \theta_{xy} - 90^\circ \quad (9)$$

시료 자체의 회전은 두 격자 벡터 사이의 각도에는 직접적인 영향을 주지 않지만, 이미지 드리프트, xy 픽셀 비율, 스캔 방향 및 축 간 교차 간섭은 직교성 결과에 영향을 줄 수 있다.

측정의 신뢰성을 확인하기 위해 다음 조건에서 반복 측정한다.

- 스캐너 중심부와 주변부
- 정방향 및 역방향 스캔
- 서로 다른 스캔 속도
- 서로 다른 스캔 크기
- 필요시 시편을 회전하거나 재장착한 조건

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

측정한 피치, 교정계수 및 직교성 편차는 평균값, 표준 편차 및 측정불확도와 함께 보고한다.

4.3 z스캐너 단차 측정 성능평가

z스캐너의 변위 특성은 인증된 단차값을 갖는 기준시편을 이용하여 평가한다. 단차 기준은 평면 위에 돌출부 또는 홈 구조가 형성되어 있고, 상부면과 하부면이 서로 평행한 구조를 사용한다. 단차 높이 평가에는 ISO 5436-1에 기반한 최소제곱법과 높이값의 빈도분포를 이용하는 히스토그램법을 적용한다.

4.3.1 단차 기준 및 측정조건

단차 기준 측정은 다음 조건을 만족하여야 한다.

- 인증 단차값과 측정불확도가 제시되어 있을 것
- 상부면과 하부면이 충분히 평탄하고 서로 평행할 것
- 측정영역에 입자, 오염, 마모 또는 손상이 없을 것
- 돌출부 또는 홈의 양쪽에 기준면이 존재할 것
- 평가할 z스캐너 범위에 적합한 단차 높이를 가질 것

z스캐너는 가능한 한 전체 변위범위의 중앙 부근에서 대칭적으로 구동되도록 설정한다. 단차 구조는 xy 스캔 범위의 중심에 위치시키고, 단차 경계가 빠른 스캔 방향에 수직이 되도록 정렬한다. 스캔 범위는 단차 구조의 폭 w 보다 충분히 크게 설정한다. 최소제곱법의 적용을 위해 측정 프로파일의 전체 길이는 최소 $3w$ 이상으로 하고, 안정적인 기준면 확보를 위해 가능하면 $4w$ 이상의 스캔 범위를 적용한다. 피드백 이득과 스캔 속도는 단차 경계에서 오버슈트, 둥글게 측정되는 현상 및 추적 오차가 최소화되도록 설정한다. 위상 이미지를 사용하는 측정 모드에서는 높이 이미지와 함께 위상 및 오차신호를 동시에 확인한다. 단차 경계에서 급격한 위상 변화가 나타난 이미지는 잘못된 높이값을 포함할 수 있으므로 분석에서 제외한다.

4.3.2 최소제곱법

ISO 5436-1에 기반한 최소제곱법은 단차를 가로지르는 각 스캔 라인에서 상부면과 하부면을 나타내는 세 구간 A, B 및 C를 설정하고, 이 구간의 높이값에 평행한 회귀선을 적용하여 단차 높이를 결정하는 방법이다.

- A와 B는 단차 구조의 양쪽 기준면에 대칭적으로 설정한다.
- C는 홈의 바닥면 또는 돌출부의 상부면에 설정한다.
- C 구간은 구조 폭 w 의 약 1/3을 기본으로 하되, 평탄한 영역만 포함하도록 조정한다.
- A와 B는 단차 경계의 경사면, 오버슈트 및 이상 신호가 포함되지 않도록 충분히 떨어진 위치에 설정한다.
- 스캔 라인의 시작과 끝부분은 스캐너의 과도응답이 포함될 수 있으므로 평가영역에서 제외

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

한다.

단차 높이 h 는 A와 B로 결정한 기준면과 C 구간의 평면 사이의 수직거리로 계산한다. 각 스캔 라인에서 단차 높이 h_i 를 산출한 후, 다수의 라인에 대한 평균값을 최종 측정 단차로 사용한다.

$$\bar{h} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i \quad (10)$$

라인별 단차 측정값의 표준편차는 반복 측정에 따른 통계적 변동성을 정량적으로 평가하여 측정 및 분석의 안정성을 확인하는 데 사용하며, 산출된 표준편차는 측정불확도 평가에 반영한다.

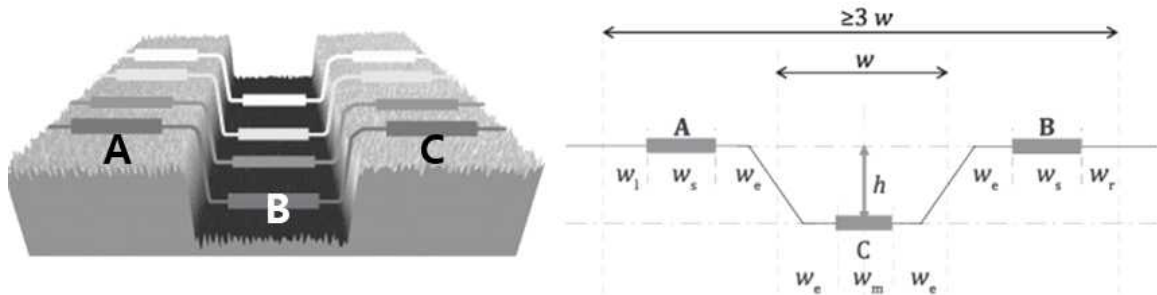


그림 12. ISO 5436-1 기반의 단차 높이 결정법

4.3.3 히스토그램 분석법

히스토그램법은 측정영역에 포함된 모든 높이값의 빈도분포를 이용하여 상부면과 하부면의 대을 선정하고, 선정된 구간에서 높이값의 무게중심을 계산한다. 상부면과 하부면의 무게중심 높이를 각각 z_{upper} 와 z_{lower} 라고 하면 단차 높이는 다음과 같이 계산한다.

$$h = z_{upper} - z_{lower} \quad (11)$$

히스토그램 분석 전에는 시료 기울기와 저차원 배경을 적절하게 제거해야 한다. 배경이 충분히 제거되지 않으면 두 피크가 넓어지거나 여러 개로 분리되어 단차 측정값이 부정확해질 수 있다. 단차 경계의 경사면, 오버슈트, 입자 오염 및 이상점은 피크의 위치와 폭에 영향을 줄 수 있으므로 분석영역에서 제외한다. 히스토그램법은 곡선 또는 복잡한 경계를 갖는 임의 형상의 단차에도 적용할 수 있지만, 상부면과 하부면의 면적 차이가 큰 경우 빈도분포가 편향될 수 있으므로 주의해야 한다.

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

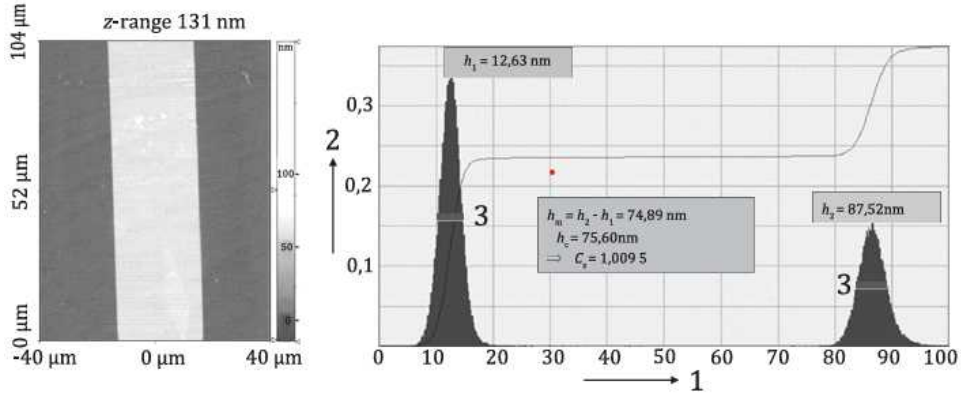


그림 13. 히스토그램 방법 (임계값 최대높이 절반, 임계값 이상에서 무게중심 결정)

4.3.4 z 스캐너 편차 및 보정계수

측정 단차값과 인증 단차값의 절대편차 및 상대편차는 식(12)과 같이 계산한다.

$$\Delta h = h_{meas} - h_{ref} \quad (12)$$

$$\delta h = \frac{h_{meas} - h_{ref}}{h_{ref}} \times 100$$

z스캐너 보정계수는 식(13) 와 같이 계산한다.

$$c_z = \frac{h_{ref}}{h_{meas}} \quad (13)$$

여기서 h_{ref} 는 기준시편의 인증 단차값이고 h_{meas} 는 AFM으로 측정한 단차값이다.

하나의 단차 기준값을 사용하여 해당 높이 부근의 z스캐너 특성만 평가할 수 있다. 하지만, z 스캐너의 전체 측정범위에서 비선형성을 평가하려면 서로 다른 단차값을 갖는 복수의 기준시편값을 사용하여 높이별 보정계수 $c_z(h)$ 를 산출하는 것이 바람직하다.

최소제곱법과 히스토그램법으로 산출한 단차값을 비교하고, 두 결과가 각각의 측정불확도 범위에서 일치하는지 확인한다. 최종 결과에는 인증값, 측정값, 편차, 보정계수, 반복성 및 확장불확도를 함께 제시한다. 확장불확도는 합성표준불확도에 포함인자 k 를 곱하여 산출하며, 측정결과와 신뢰성과 비교 가능성을 정량적으로 제시하기 위한 것이다. 일반적으로 약 95%의 신뢰수준에서 포함확률에 해당하도록 $k=2$ 를 적용하여 측정결과와 함께 제시한다.

5. 준비사항

5.1 원자힘현미경 준비

평가 대상 AFM의 정상 작동 여부를 확인하고 장비명, 측정 모드, 사용하는 탐침, 스캐너 형식, 최대 스캔 범위를 기록한다.

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

5.2 격자 기준시료 준비

xy 스캐너의 구동 편차 및 직교성 평가를 위해 인증된 피치와 측정불확도를 갖는 일차원 또는 이차원 격자 시료를 준비한다. 직교성 평가에는 두 방향의 기준각이 제공된 이차원 격자 기준을 사용한다.

5.3 탐침 및 시료 장착

격자 구조의 크기와 형상에 적합한 탐침을 사용한다. 격자 표준은 측정 중 이동하지 않도록 시료 홀더에 견고하게 고정하고, 격자 방향을 AFM의 x축과 y축에 가깝게 정렬한다.

5.4 측정환경 기록

온도, 상대습도, 진동, 음향, 공기 흐름 및 전자기적 간섭이 최소화된 환경에서 측정한다. 측정 중 온도와 상대습도를 확인하여 기록한다.

5.5 장비 안정화 진행

AFM과 스캐너를 충분히 예열할 수 있게 30분 이상 기다린다. 탐침 또는 시료를 교체하거나 스캔 크기와 위치를 변경한 경우에는 크리프와 드리프트가 안정될 때까지 측정을 기다린다.

5.6 측정조건 설정

격자 피치를 충분히 분해할 수 있도록 스캔 범위, 픽셀 수, 스캔 속도, 피드백 이득 및 설정값을 결정한다. 정방향과 역방향을 동일한 조건으로 측정하며, 각 격자 주기당 충분한 픽셀 수를 확보한다.

5.7 보정 설정 확인

x축, y축, z축 보정계수, 비선형성 보정 및 록업 테이블의 적용 여부를 확인하고 기록한다. 보정 전후를 비교하는 경우에는 동일한 측정조건을 적용한다.

5.8 데이터 분석 준비

xy스캐너 보정시 무게중심법, 교차상관법 또는 푸리에 변환 기반 분석법을 사용할 수 있는 프로그램을 준비한다. z스캐너 보정시는 최소 제곱법 또는 히스토그램 분석법을 사용할 수 있게 프로그램을 준비한다. 분석 프로그램의 명칭, 버전, 전처리 조건 및 계산 매개변수를 기록한다.

5.9 반복 측정 및 불확도 평가

동일한 조건에서 반복 측정을 수행할 수 있도록 측정계획을 수립한다.

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

5.10 측정기록서

장비와 스캐너 정보, 격자 표준 및 탐침 정보, 환경조건, 측정조건, 보정계수, 분석조건, 반복 측정 결과 및 특이사항을 기록할 수 있는 측정기록서를 준비한다.

6. 소요장비 명세

성능평가에 필요한 장비 명세는 다음표와 같다.

표 1. 웨이퍼 측정용 원자힘현미경 및 부속품의 최소 요구 성능과 수량

장 비 명	최소 요구 성능	수 량
원자힘 현미경 (웨이퍼 측정용)	수평 방향 측정 범위 : $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ 수직 방향 측정범위: $10\ \mu\text{m}$ 수직 방향 분해능: $45\ \text{pm}$ 최대 측정 시편 크기 : $20.32\ \text{cm} \times 20.32\ \text{cm}$	1
기타 필요한 부속품	핀셋, 블로워, 시편 홀더 등.	1

한국표준과학연구원에 구축된 그림 14의 원자힘 현미경을 이용하여 성능평가를 수행하였다. xy 스캐너의 구동 편차와 좌표축 직교성을 평가하기 위해 인증된 피치값을 갖는 일차원 또는 이차원 측면 격자 기준물을 사용하였다. 스캐너 구동 편차는 x축과 y축 방향에서 측정한 피치값을 격자 기준물의 인증값과 비교하여 평가하였다. 좌표축 직교성은 이차원 격자의 두 격자 벡터 사이의 각도를 측정하고, 이상적인 직각인 90° 로부터 벗어난 정도를 산출하여 검증하였다. z스캐너의 변위 특성은 인증된 단차값을 갖는 기준시편을 측정한 후, 최소제곱법 또는 히스토그램 분석법으로 단차 높이를 산출하여 평가하였다. 또한 외부 진동이 측정결과에 미치는 영향을 최소화하기 위해 그림 15와 같이 능동 제진대를 사용하였다. 이를 통해 측정 위치의 진동 수준을 Class VD-E 이하로 유지하고, 나노미터급 단차 및 격자 구조 측정 시 외부 환경에서 유입되는 진동 잡음의 영향을 최소화하였다.

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02



그림 14. 한국표준과학연구원에 구축된 측정범위 100 μm 원자힘 현미경

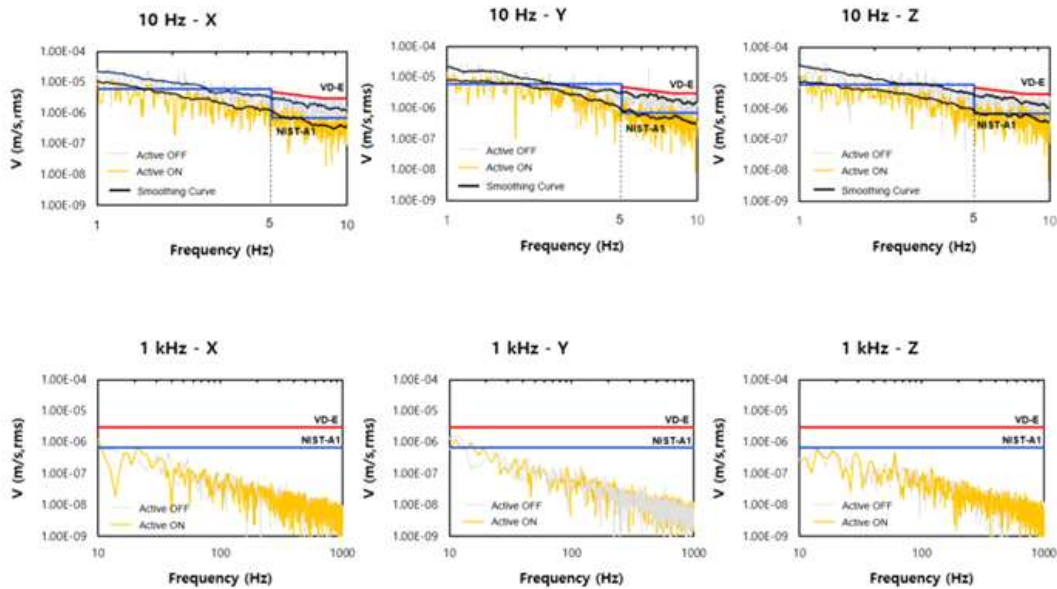


그림 15. 원자 힘 현미경 측정을 위한 설비 진동 노이즈 측정 결과
(능동 제진대 사용시 : 진동 수준 Class VD-E 이하 확보함)

원자힘 현미경을 평가를 위한 시편들은 다음과 같다.

- ◆ VLSI STS2-1000 QC S/N 3091-03-15, NIST Certified
Step height: $(100.8 \pm 1.4) \text{ nm}$, pitch: $(2.992 \pm 0.026) \mu\text{m}$
- ◆ VLSI STS2-180P QC S/N 4531-41-076, NIST Certified
Step height: $(19.1 \pm 0.9) \text{ nm}$, pitch: $(2.992 \pm 0.027) \mu\text{m}$
- ◆ TipsNano TGZ2_PTB, S/N TN170210, PTB Certified step height: $(110.12 \pm 1.98) \text{ nm}$

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

7. 시험방법

(참고: 본 시험방법은 환경 영향성 정량화를 진행 후 xy 스캐너 구동 편차 및 직교성 평가나 z 스캐너 단차 측정 성능평가를 수행한다.)

7.1 공통 시험 조건

표 2. 원자힘 현미경 성능 평가를 위한 시험조건 및 주요 확인사항

구분	시험조건 및 확인사항
장비	조각 시편용 또는 웨이퍼용 AFM의 모델, 스캐너, 측정 모드, 최대 스캔 범위 및 교정상태를 기록한다.
환경	능동 제진대와 방음 덮개를 사용하고, 온도·상대습도 및 진동상태를 기록한다. 목표 진동 수준은 구축 환경의 관리기준인 Class VD-E 이하로 한다.
기준시편	인증서 또는 교정성적서의 인증값, 불확도, 기준온도, 유효기간, 사용 위치와 방향을 확인한다.
탐침	격자 또는 단차 형상에 적합한 탐침을 사용하고, 측정 전후에 오염·마모·이중팁 여부를 확인한다.
보정상태	x, y, z 보정계수, 페루프 제어, 비선형성 보정 및 록업 테이블 적용 여부를 시험 전후 동일하게 유지한다.
원시데이터	높이, 오차신호 및 필요한 경우 위상신호를 함께 저장한다. 원시 데이터와 처리 데이터를 모두 보존한다.

7.2 사용 표준시편

표 3. 원자힘 현미경의 xy피치 및 z단차 성능 평가에 사용된 기준 시편

표준시편	용도	보유값 또는 공칭값	사용 시 유의사항
VLSI STS2-1000 QC S/N 3091-03-15	xy피치 확인 및 z단차 (CRM)	-단차: (100.8 ± 1.4) nm -피치: (2.992 ± 0.026) μm	해당 시편 인증서의 값과 단위를 최종 적용, 오염과 마모가 없는 영역을 설정함
VLSI STS2-180P QC S/N 4531-41-076	xy피치 확인 및 z단차 (CRM)	-단차: (19.1 ± 0.9) nm -피치: (2.992 ± 0.027) μm	해당 시편 인증서의 값과 단위를 최종 적용, 오염과 마모가 없는 영역을 설정함
TipsNanoTGZ2_PTB S/N TN170210	z단차 (CRM)	-단차: (110.12 ± 1.98) nm	해당 시편 인증서의 값과 단위를 최종 적용, 오염과 마모가 없는 영역을 설정함

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

7.3 환경 영향성 정량화

환경 영향성 시험은 스캐너 교정 전에 실시하며, 외부 영향과 장비 자체의 변화를 가능한 한 분리하여 평가한다. 동일 시료, 동일 탐침 및 동일 측정조건을 유지하고 한 가지 환경요인만 변화시켜 기준조건과 비교한다.

표 4. 환경 영향성 정량화 기준 조건

시험항목	시험시편	시험방법	정량화 결과
장비 가동 후 안정화시간	2D 격자 또는 특징점이 명확 한 시편	전원 인가 후 30분부터 일정 간격 으로 동일 영역을 반복 측정한다. 위치·피치·평균 높이의 시간변화 를 기록한다.	x·y 드리프트 속 도, 피치 변화율, 안정화 완료시간
시료·탐침 교체 후 대기시간	동일 격자 또는 단차 기준물	교체 직후부터 동일 영역을 연속 측정하고, 이미지 상판 피크와 피치 또는 단차값이 안정되는 시간을 구 한다.	교체 후 최소 대 기시간, 크리프 감 쇠 특성
온도·습도 영향	인증 격자 또는 단차 기준물	온도와 습도를 주기적으로 기록하 면서 동일 위치를 반복 측정하고 측정값과 환경값의 관계를 회귀분 석한다.	온도 민감도 $ST = \Delta M / \Delta T$, 습도 민감도 $SH = \Delta M / \Delta RH$
진동·음향· 공기 흐름	평탄도 시편 또는 평탄도 기준 물	제진·방음 조건의 작동 전후 또는 환경요인의 유무를 비교한다. 동일 스캔조건으로 높이 영상과 라인 신 호를 취득한다.	R_{qz} 또는 S_{qz} , P-V, 주기성 잡음, 이미지 위치 변화
정적·동적 노이즈	평탄도 시편	정적 시험은 xy 이동을 정지하고 z 신호를 기록한다. 동적 시험은 연속 스캔 라인 또는 반복 영상을 취득 하여 차이를 계산한다.	RMS 노이즈, 표준 편차, 라인 차분 RMS
장기 안정성	동일 격자 및 단차 기준물	동일 조건에서 시간 또는 날짜 간 격으로 반복 측정한다.	$C_x, C_y, C_z, \gamma_{xy}$ 의 평균·표준편차· 변동계수와 시간 추세

7.3.1 환경 영향성 정량화 시험 순서

(본 절차서에서 특별한 사유가 없는 한 측정 반복 횟수는 11회 이상으로 규정한다. 이는 A형 불확도를 산출하기 위해 충분한 표본을 확보하기 위한 최소한의 횟수이며, 장비의 조건 및 측정 시간 제약을 고려하여 반복 횟수를 그 이하로 설정한 경우는 유효자유도 저하 및 불확도 증가 영향을 감수하는 것으로 성능 평가서에 기재해야 한다. A형 불확도는 동일한 측정조건에서 반복 측정한 결과의 통계적 변동성을 바탕으로 평가하는 불확도이다. 일반적으로 반복 측정값의 표준편차와 측정횟수를 이용하여 평균값의 표준불확도를 산출한다. 반면, B형 불확도는

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

반복 측정의 통계적 분석이 아닌 교정성적서의 인증값 및 불확도, 장비 분해능, 표준물질의 인증불확도, 환경조건, 제조사 사양 및 기존 측정자료 등의 정보를 바탕으로 평가한다.)

- AFM, 제진대, 방음 덮개 및 환경 모니터의 작동상태를 확인한다.
(장비 상태, 온도, 습도, 진동 등급)
- 표준시편을 장착하고 탐침을 정렬한 뒤 기준 측정조건을 설정한다.
(시편 · 탐침, 스캔 크기, 속도, 픽셀)
- 기준 환경에서 반복 영상을 취득하여 기준 노이즈와 드리프트를 산출한다.
(기준 R_{qz} , P-V, v_{d-x} , v_{d-y})
- 평가대상 환경요인 한 가지를 변화시키거나 차단 전후를 비교한다.
(변화요인과 발생시간)
- 동일 조건으로 11회 이상 반복 측정한다.
(원시 파일명과 반복번호)
- 기준조건 대비 변화량, 민감도 및 반복성을 계산한다.
(평균, 표준편차, 변화율)
- 허용 환경범위와 필요한 대기시간을 작업지침에 반영한다.
(최종 관리조건)

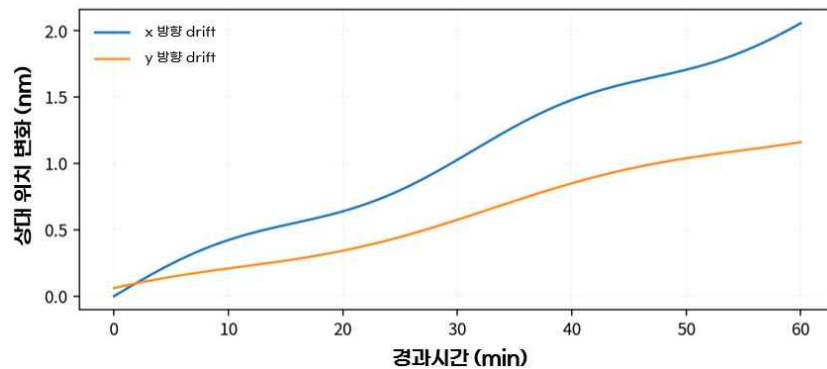


그림 16. 일정 조건에서 시간에 따른 x와 y 상대 위치 변화 (Drift)

- 수직 드리프트는 평탄도가 알려진 표준시편 또는 평탄한 영역을 가진 시편을 사용한다. 일반적으로, R_{qz} 또는 $S_{qz} < 2 \text{ nm}$, $P-V < 10 \text{ nm}$ 를 가진 시편을 사용한다. 주변 환경조건의 변화, 챔버 개방, 장비 구성요소의 전원에 따른 영향성을 확인한다. 수평 드리프트는 직선형 모서리 또는 낮은 단차를 가진 선 구조, 해당 구조가 측정 방향과 평행 또는 수직으로 정렬된 구조, 낮은 단차 높이를 가진 2차원 격자 구조를 가진 시편을 사용한다. $v_{d-x} = \Delta x / \Delta t$ 및 $v_{d-y} = \Delta y / \Delta t$ 로 계산한다.

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

- 정적인 높이 노이즈 (static z-noise)는 평가영역에서 평균 높이를 제거한 후 RMS값 또는 표준편차로 계산한다. 측정시 기계적 진동 차단, 음향 진동, 전자기 차폐 상태에서 진행한다. 시편 표면을 스캔하지 않은 상태에서 시간에 따라 측정을 하며, 노이즈 발생시 바닥 진동, 건물 진동, 진공펌프나 냉각팬의 진동, 사람의 이동, 문 개폐, 음성이나 공조기 소음, 50/60 Hz 전원 노이즈, 전자기 간섭, 검출기 및 전자회로 노이즈, 레이저 변동 등을 확인하여 교정 후 측정을 다시 진행한다. 동적인 높이 노이즈 (dynamic z-noise)는 장비 안정 후 두 번 이상의 표면 스캔을 빠르게 연속 측정하여 스캔 사이의 차이를 분석한다.

$\Delta z(x) = z_1(x) - z_2(x)$ 이를 통해 동적 높이 노이즈를 알 수 있다. 동적 노이즈는 R_{qz} 또는 $S_{qz} < 2 \text{ nm}$, $P-V < 10 \text{ nm}$ 보다 크게 발생시 스캐너 구동 노이즈, 피드백 응답 변동, 진동, 전기적 노이즈, 탐침-시편 상호작용 변화, 라인 간 위치 오차 등을 확인하여 교정 후 측정을 다시 진행한다.

7.4 xy 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 평가

xy축 이송 편차는 인증된 피치값을 갖는 1D 또는 2D 측면 격자 기준물로 수행한다. 1D 기준물은 시편을 약 90° 회전하여 x축과 y축을 각각 측정하고, 직교성은 좌표축에 따라 두 격자 벡터를 동시에 구할 수 있는 2D 표준으로 평가한다.

7.4.1 측정조건 및 시편 정렬

표 5. AFM 측정 조건 설정 및 확인 방법

항목	설정 및 확인방법
측정 위치	격자 표준의 오염·마모·결함이 없는 영역을 선택하고 스캐너 중앙에 위치시킨다.
격자 방향	1D 격자는 격자선이 측정축에 수직이 되도록 정렬한다. 2D 격자는 두 방향을 동시에 관찰할 수 있도록 한다.
스캔 범위	각 방향에 최소 5주기 이상 포함한다. 무게중심법에서는 시작과 끝 구조를 포함해 충분한 회귀점을 확보한다.
픽셀 수	주기당 최소 7픽셀 이상, 가능하면 10픽셀 이상이 되도록 설정한다.
스캔 속도	일반 측정에서 사용하는 속도를 기본으로 하고, 필요하면 서로 다른 속도에서 확장시험을 시행한다.
스캔 방향	정방향·역방향을 모두 저장하고 0° 및 90° 조건을 필요에 따라 비교한다.
피드백	오류신호, 오버슈트 및 라인 왜곡이 최소가 되도록 P·I gain과 setpoint를 조정한다.

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

7.4.2 xy 스캐너 구동 편차 시험 순서

- 시험 전 적용된 $x \cdot y$ 교정계수와 룩업 테이블을 확인하고 저장한다.
(보정 전 C_x , C_y 및 보정상태)
- 격자 기준물의 인증 피치, 불확도, 기준온도 및 방향을 확인한다.
(p_{x_ref} , p_{y_ref} , u_{ref})
- 설정한 스캔 크기, 속도, 픽셀로 정방향 및 역방향 이미지를 취득한다.
(높이와 오류신호)
- 필요 최소한의 1차 평면화와 라인 오프셋 제거만 적용한다.
(전처리 차수와 제외영역 설정)
- 무게중심법 또는 FFT 기반 교차상관법으로 격자 중심좌표를 구한다.
(중심좌표와 상관 피크를 통해 계산함)
- 여러 주기를 반복으로 측정한 후 회귀선 간 거리를 통해 평균 피치 p_{x_meas} 와 p_{y_meas} 를 구한다.
(평균 피치와 반복성)
- 절대편차, 상대편차 및 교정계수를 계산한다.
(Δp_x , Δp_y , δp_x , δp_y , c_x , c_y)
- 독립 영상을 11회 이상 측정하고 평균과 표준편차를 계산한다.
($\bar{x}$, $\bar{y}$, A형 표준불확도)
- 교정계수를 적용하는 경우 동일 조건으로 재측정하여 잔류편차를 확인한다.
(보정 후 잔류편차)

7.4.3 무게 중심법

각 격자 구조의 신호분포에 임계값을 적용하여 구조를 분리하고, 픽셀 위치와 신호강도로 $x \cdot y$ 무게중심 좌표를 계산한다. 2차원 격자점 중심좌표 행렬 내의 동일한 행 또는 열의 중심좌표에 최소 제곱 회귀선을 적용하고, 서로 평행한 회귀선(g_n) 사이의 수직거리(S_x)를 구한다. 하나의 인접 간격 보다 여러 주기를 포함하는 거리를 주기 수로 나누어 평균 피치를 계산한다.

표 6. 무게 중심법 관리 방법

확인항목	관리내용
임계값	모든 반복 측정에 동일한 설정 원칙을 적용하고 값을 기록한다.
중심좌표	경계에 걸리거나 결함이 있는 구조는 사유를 기록하고 제외한다.
회귀선	각 방향에서 최소 6개 이상의 중심좌표를 이용하는 것을 권장한다.
이상값	사전 정의한 기준에 따라 처리하며 임의 삭제하지 않는다.

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

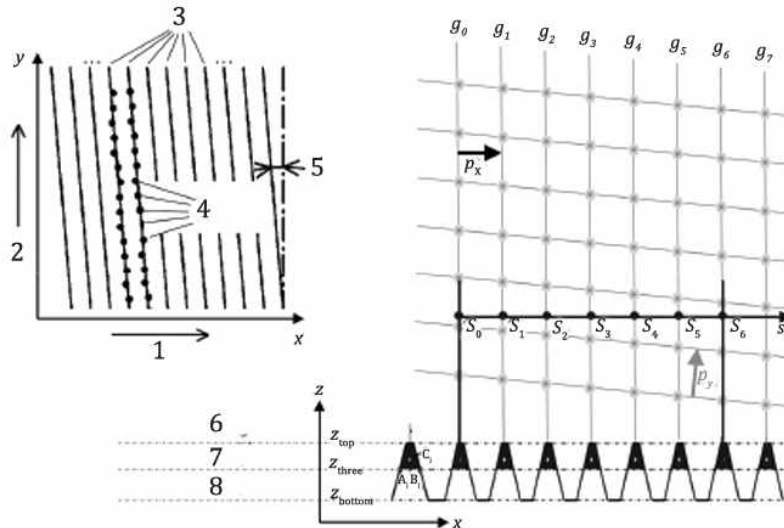


그림 17. 무게 중심법을 이용한 2차원 평면 격자 기준물 ‘평균’ 피치 측정 방법
(보통 6배의 격자 주기 적용, S_6)

□ 무게 중심법은 다음과 같은 방법으로 계산을 진행하게 된다.

- 1) 격자 구조를 인식한다. (기준 시편의 x축 및 y축 방향이 각각 AFM 직교 좌표축에 일치되도록 정렬시킨다.)
- 2) 개별 격자 구조의 무게 중심을 계산한다. (x축 및 y 축 방향별 무게 중심을 계산한다.)
- 3) x축 및 y축 방향별 회귀선을 수치맞춤 계산을 통해 구한다.
- 4) 평가영역 양 끝의 두 회귀선을 이용하여, x축 및 y축 각 방향으로의 회귀선 절편값을 계산한다. (각 축방향에 대한 격자 주기를 구한다.)
- 5) 보정계수를 계산한다. (회귀선 기울기와 측정된 격자 주기를 비교하여 보정계수를 구한다.)

무게 중심법을 이용 시 고정밀 측정이 가능하고 국소적 변형도 잘 감지하지만 노이즈와 거칠기 그리고 국소적 왜곡에 민감하며 전반적인 변형이 큰 시편일 때는 정확도가 떨어지게 된다.

7.4.4 교차 상관법

전체 이미지에서 대표 단위 셀을 선택하고, 단위 셀과 전체 이미지 사이의 교차상관을 계산한다. 각 격자 위치에 대응하는 상관 피크의 무게중심을 결정한 뒤, 피크 좌표 사이의 간격으로 $x \cdot y$ 평균 피치를 계산한다. 단위 셀 크기, 창 함수, 경계처리 및 피크 보간법은 모든 반복 측정에 동일하게 적용한다. 다만, 본 시험절차에서는 해당 방법을 실제 피치 산출에 적용하지 않으며, 피치 측정에 활용할 수 있는 참고 방법론으로 제시한다.

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

□ 교차 상관법은 다음과 같은 방법으로 계산을 진행하게 된다.

- 1) AFM 이미지에서 격자 패턴 식별한다.
- 2) 푸리에 변환을 진행한다.
- 3) 교차상관 분석을 진행한다.
(전체 격자 이미지와 unit cell 격자 상호 작용을 계산해서 격자의 위치를 찾는다.)
- 4) 비교를 하면서 격자 위치의 피크를 찾는다.
- 5) 피크의 무게중심을 계산한다.
- 6) 무게중심의 평균값으로 격자 간의 주기와 간격을 측정한다.
(평균 x, y pitch 값을 구할 수 있다.)

교차 상관법을 이용시 고해상도 측정이 가능하며, 국소적 왜곡이나 불규칙성 있는 경우에도 정확하게 측정이 가능하다. 이를 통해, 격자 주기와 구조적 특성 정확히 파악할 수 있다. 하지만, 높은 계산량이 필요하므로 시간이 많이 소요된다.

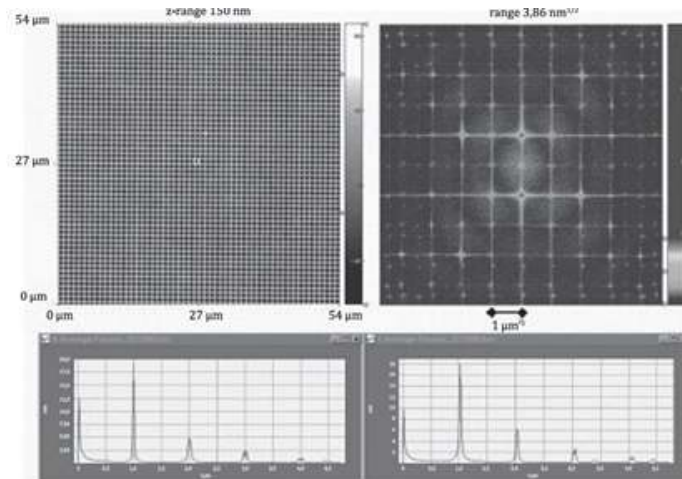


그림 18. FFT 교차 상관법을 이용한 격자 주기 산출 후 보정 방법

7.4.5 직교성 평가 시험 순서

- 기준각 θ_{ref} 가 제공되거나 검증된 2D 격자 표준시편을 측정한다.
(θ_{ref} 와 불확도)
- 스캐너 중앙에서 두 격자방향이 충분히 포함된 이미지를 취득한다.
(2D 격자 이미지)
- 각 격자 구조의 중심좌표 또는 푸리에 피크로 두 격자 벡터 p_x , p_y 를 결정한다.
(벡터 성분과 회귀선)

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

- 두 벡터 사이의 측정각 θ_{xy} 를 계산한다.

$$(\theta_{xy})$$

- $\gamma_{xy} = \theta_{xy} - \theta_{ref}$ 로 비직교성을 계산한다.

$$(\theta_{ref} = 90^\circ \text{인 경우 } \gamma_{xy} = \theta_{xy} - 90^\circ \text{이다.})$$

- 11회 이상 반복하고 정·역방향, 중심·주변부 및 필요시 시편 재장착 결과를 비교한다.

(평균, 표준편차, 위치의존성)

- 보정 적용 후 동일 조건으로 재측정하여 0으로 수렴되는지 잔류 비직교성을 확인한다.

$$(\text{보정 후 } \gamma_{xy})$$

격자 방향에 대해 두 개의 직선을 정렬 후 두 선이 이루는 각을 여러 번 측정에서 평균값을 얻는다. 푸리에 공간에서 격자를 기술하는 경우는 두 개 벡터 간 각도를 계산한다. 측정표준의 기준값과 계산된 값의 비율을 통해 보정 계수 (c_x , c_y)를 구할 수 있다. 스캔 된 이미지의 신뢰성을 높이기 위해 중간 위치에서 보정 계수값을 구한다. 이를 통해 직교성을 계산한다.

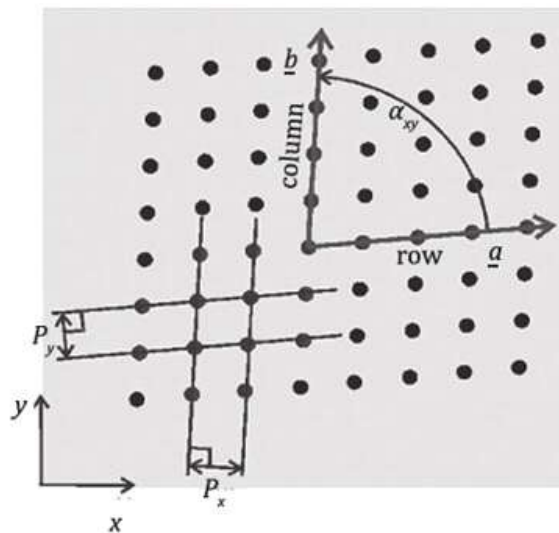


그림 19. 2차원 격자 표준을 통한 직교성 평가 방법

7.5 z스캐너 단차 측정

z스캐너는 인증된 단차 표준을 측정하고, ISO 5436-1 기반 최소제곱법 또는 히스토그램법으로 단차 높이를 산출하여 평가한다. 단차의 상부·하부 기준면이 충분히 평탄하고 서로 평행하며, 구조의 양쪽에 기준면이 존재하는 시편을 사용한다.

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

7.5.1 측정조건 및 시편 정렬

표 7. z스캐너 단차 측정 조건 설정 및 확인방법

항목	설정 및 확인방법
z 중심위치	z스캐너가 전체 범위의 약 50 %를 중심으로 대칭적으로 구동되도록 설정한다.
구조 위치	단차 구조를 xy 스캔 범위의 중앙에 위치시킨다.
방향	단차 경계를 빠른 스캔 방향에 수직으로 정렬한다.
스캔 범위	프로파일 길이는 구조 폭 w의 최소 3배 이상, 가능하면 4배 이상으로 설정한다.
픽셀 · 라인	상 · 하부 평면에서 충분한 점과 라인을 확보하도록 설정한다.
피드백	경계에서 오버슈트와 동글어짐이 최소가 되도록 gain, setpoint 및 속도를 조정한다.
동시신호	높이와 오류신호를 저장하고, 간헐접촉 모드에서는 위상신호도 함께 저장한다.
반복	동일 조건에서 독립 영상 11개 이상을 취득한다.

7.5.2 z 스캐너 구동 편차 시험 순서

- 단차 표준의 인증값, 불확도 및 유효한 측정영역을 확인한다.
(h_{ref} 와 u_{ref})
- 시편을 세척 · 장착하고 광학계와 탐침을 정렬한다.
(오염 및 손상 유무 확인)
- z중심위치와 스캔 범위를 설정하고 저속 예비 스캔으로 시편을 확인한다.
(오류, 위상, 오버슈트 확인)
- 높이, 오류 및 필요한 경우 위상 영상을 동시에 저장한다.
(측정 이미지 파일)
- 1차 평면 또는 라인별 배경을 제거하되 단차 자체는 보존한다.
(전처리 방법)
- 최소제곱법과 히스토그램법 중 지정된 방법으로 단차를 산출한다.
($z_{upper} - z_{lower}$ 또는 h_i)
- 11회 이상 반복하고 평균, 표준편차, 편차 및 c_z 를 계산한다.
- 필요하면 서로 다른 단차 표준으로 높이별 $c_z(h)$ 를 평가한다.
(z비선형성 확인)

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

7.5.3 ISO 5436-1 기반 최소제곱법

각 스캔 라인에서 단차 양쪽 기준면을 A와 B, 홈의 바닥면 또는 돌출부의 상부면을 C로 설정한다. A와 B는 구조 중심에 대해 대칭적으로 배치하고, C는 전체 구조 폭 w 의 약 $1/3$ 을 기본으로 하되 완전히 평탄한 구간만 포함하도록 조정한다. 경계 경사면, 오버슈트, 스캔 시작·종료부 및 오염영역은 제외한다.

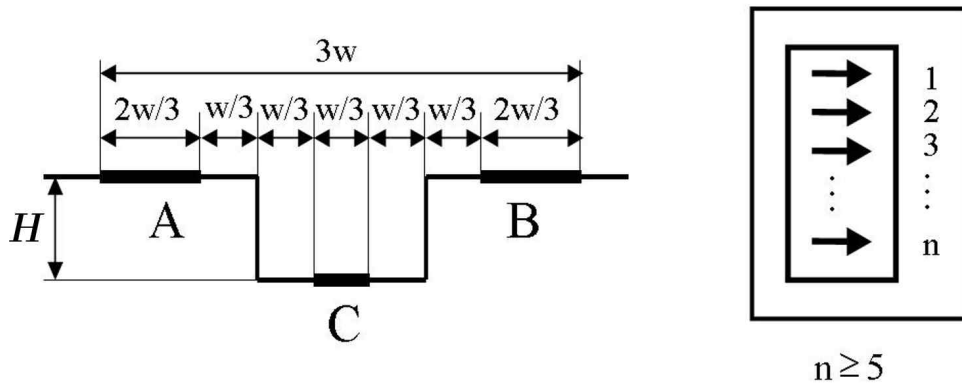


그림 20. 단차 측정값 계산 (KS B ISO 5436-1:2000 참고)

그림 22와 같이 얻어진 표면 형상의 A, B, C 부분 측정 데이터에 대하여 식 (14)으로 표현되는 ‘분절 직선(segmented line)’ 모델을 이용해 최소제곱법(least square method) 수치맞춤을 수행하면 h 값이 얻어지며, 단차값은 $H=2h$ 이 된다.

$$z = \alpha \times x + \beta + h \times \delta \quad (14)$$

위 식에서 z 와 x 는 단차 형상을 측정하여 얻은 수직 방향과 수평 방향의 측정값을 나타내고 α , β , h 는 최소제곱법으로 맞춤하여 구할 미지의 인자값이다. δ 는 A, B 부분에서는 +1, C 부분에서는 -1의 값을 갖는다. 최소제곱맞춤 방법을 이용하여 계산된 단차값은 식 (15)와 같다.

$$H_1 = \frac{a \sum_{i=1}^n z_i + b \sum_{i=1}^n (x_i z_i) + c \sum_{i=1}^n (z_i \delta_i)}{d} \quad (15)$$

여기서,

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

$$\begin{aligned}
a &= -2 \left\{ \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n (x_i \delta_i) - \sum_{i=1}^n \delta_i \sum_{i=1}^n x_i^2 \right\}, \\
b &= 2 \left\{ n \sum_{i=1}^n (x_i \delta_i) - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n \delta_i \right\}, \\
c &= -2 \left\{ n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right\}, \\
d &= -n^2 \sum_{i=1}^n x_i^2 + n \left\{ \sum_{i=1}^n (x_i \delta_i) \right\}^2 + n \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 - 2 \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n \delta_i \sum_{i=1}^n (x_i \delta_i) + \left(\sum_{i=1}^n \delta_i \right)^2 \sum_{i=1}^n x_i^2
\end{aligned}$$

위 식에서 n 은 계산에 사용된 전체 데이터 개수, z_i 와 x_i 는 i 번째 데이터의 수직 방향과 수평 방향 측정값을 각각 나타낸다. δ_i 는 i 번째 데이터가 A, B 부분에 해당하면 +1, C 부분에 해당하면 -1의 값을 갖는다.

7.5.4 히스토그램법

평면화된 측정영역의 높이값 빈도분포에서 상부면과 하부면에 대응하는 두 개의 피크를 확인한다. 각 피크에 대하여 최대 빈도의 절반 이상에 해당하는 높이 구간을 선정하고, 해당 구간의 높이값에 대한 무게중심을 계산한다. 상부면과 하부면에서 얻어진 두 무게중심의 차이를 단차 높이로 산출한다.

히스토그램 방법을 이용한 단차 높이 분석에서는 시편의 기울기, 스캐너의 비선형성 및 bow, 열적 드리프트, 라인 간 오프셋 등으로 발생하는 저주파 배경 신호를 분석 전에 충분히 제거하여야 한다. 이러한 배경 성분이 잔존할 경우 동일한 상부면 또는 하부면에서도 위치에 따라 높이값이 달라져 히스토그램 피크가 넓어지거나 비대칭적으로 변형될 수 있으며, 경우에 따라 하나의 피크가 여러 개로 분리될 수 있다. 이로 인해 각 면의 대표 높이 및 무게중심 위치가 변하여 단차 높이에 체계적인 측정오차가 발생할 수 있다.

배경 신호의 보정은 단차의 경계부와 결함, 입자 등의 이상영역을 제외한 상부 및 하부의 평탄영역을 기준영역으로 선정한 후 수행한다. 우선 측정 영상 전체에 존재하는 시편의 기울기를 제거하기 위하여 기준 평면에 대한 1차 평면 보정을 적용한다. 이후 스캔 라인별 오프셋이나 완만한 곡률이 잔존하는 경우에는 단차 경계영역을 제외한 평탄부를 기준으로 라인별 평균 또는 1차 함수 보정을 추가로 적용한다. 스캐너 bow 등 비선형적인 저주파 배경이 명확하게 존재하는 경우에는 필요에 따라 저차 다항식 보정을 적용할 수 있으나, 실제 표면 형상이나 단차 높이가 제거되지 않도록 과도한 고차 보정은 지양한다.

보정 후에는 상부면과 하부면이 각각 충분히 평탄하게 유지되는지 확인하고, 높이 히스토그램에서 두 피크의 폭과 분리 상태를 검토한다. 배경 보정의 목적은 단차 자체의 높이차를 변화시키는 것이 아니라 측정면에 중첩된 기울기 및 저주파 배경 성분만을 제거하여 상·하부면의 대표 높이를 정확하게 결정하는 데 있다. 다만, 본 시험절차에서는 해당 방법을 실제 높이값 산출

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

에 적용하지 않으며, 높이 측정에 활용할 수 있는 참고 방법론으로 제시한다.

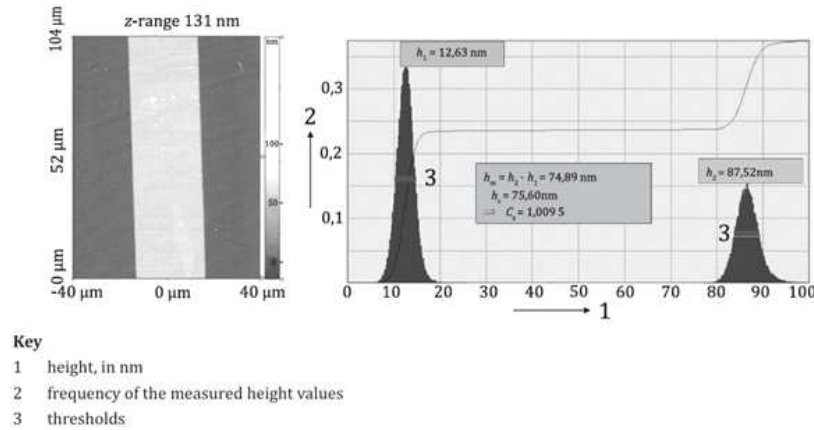


그림 21. 히스토그램 방법 (임계값 최대높이 절반, 임계값 이상에서 무게중심)

8. 평가 불확도 산정

원자힘현미경(AFM)은 시료 표면의 형상뿐만 아니라 나노미터 수준의 단차 높이를 정량적으로 측정할 수 있다. 따라서 장비의 성능을 신뢰성 있게 평가하기 위해서는 교정된 측정설비를 이용하여 표준단차 시편의 기준값을 산출하고, 해당 값에 수반되는 측정불확도를 함께 평가해야 한다. 본 절에서는 측정설비의 교정 결과와 반복 측정값을 바탕으로 표준단차 시편의 인증값을 결정하고, 측정 반복성, 설비 교정, 기준시편 및 환경조건 등 주요 불확도 요인을 반영하여 합성표준불확도와 확장불확도를 산정하였다. 이를 통해 산출된 인증값과 불확도는 원자힘현미경의 Z축 스캐너 보정과 단차 측정 성능평가를 위한 기준으로 활용할 수 있다.

8.1 인증값 불확도 평가를 위한 수학적 모델

(1) 무게중심법을 이용한 xy스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 평가

표준시편 인증값 계산의 수학적 모델은 식 (16)과 같이 표현된다.

$$P_x = \frac{1}{N} \left[(x_N - x_0) c_x + \delta p_{Abbe} + \delta p_{Drift} + \delta p_{Noise} + \delta p_{tip} + \delta p_{nl} \right] \frac{\cos \phi_{xy}}{\cos \theta_{sx} \cos \theta_{xz}} + \delta p_{th} + \delta p_{RoI} \quad (16)$$

N은 격자 주기, $x_N - x_0$ 은 위치센서로 측정한 주기 거리, c_x 는 x축 교정계수, ϕ_{xy} 는 스캔 방향에 따른 격자 법선의 정렬각, θ_{sx} 는 스캔 방향에 따른 x 축 센서의 위치 변화값, θ_{xz} 스캔면에 대한 시편의 기울기, p_{th} 는 시편 열팽창 영향, p_{RoI} 는 시편 위치별 균질성을 나타낸다.

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

(2) 최소제곱법을 이용한 Z 스캐너 구동 편차

z스캐너의 구동 편차는 서로 다른 인증 단차값을 갖는 복수의 단차 표준시편을 측정하고, 인증 단차값과 AFM 측정값 사이의 관계를 최소제곱법으로 평가한다. 단차 표준시편의 인증값을 독립변수로 하고 AFM으로 측정한 평균 단차값을 종속변수로 하여 다음과 같은 선형 모델을 적용한다.

$$z_i = a + bH_i + \epsilon_i \quad (17)$$

H_i 는 i 번째 단차 표준시편의 인증값, z_i 는 i 번째 단차 표준시편에 대한 AFM 평균 측정값, a 는 회귀직선의 절편, 즉 z 축 영점 오프셋, b 는 회귀직선의 기울기, 즉 z 스캐너의 보정계수, ϵ_i 는 i 번째 측정점의 회귀잔차를 나타낸다.

8.2 합성표준 불확도 수식의 표현

(1) 무게중심법을 이용한 X-Y 스캐너 구동 편차 및 직교성 평가

각 입력량 x_i 의 표준불확도 $u(x_i)$ 에 감도계수 $c_i = \frac{\partial p}{\partial x_i}$ 을 곱하여 피치 단위의 불확도 기여량 $u_i(p)$ 을 구한다.

$$u_i(p) = |c_i| u(x_i) \quad (18)$$

$$u_c(p) = \sqrt{\sum_{i=1}^n [c_i u(x_i)]^2}$$

입력량 사이에 서로 상관성이 있으면 식(21)과 같이 표현된다.

$$u_c^2(p) = \sum_{i=1}^n c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_i c_j u(x_i, x_j) \quad (19)$$

(2) 최소제곱법을 이용한 Z 스캐너 구동 편차

최소제곱법을 이용하여 계산한 i 번째 단차 높이에서의 z 스캐너 구동 편차는 다음의 측정모델로 나타낸다.

$$z_{\text{scanner}_i} = z_i - a - bH_i + \sum_{j=1}^m \delta_j \quad (20)$$

여기서, z_i 는 AFM으로 측정한 i 번째 평균 단차값, H_i 는 i 번째 단차 표준시편의 인증값, a 는 최

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

소제곱 회귀직선의 절편, b 는 최소제곱 회귀직선의 기울기, δ_j 는 측정 반복성, 분해능, 표준시편 균질도, 온도변화, 드리프트, 노이즈 및 기타 영향량에 대한 보정항을 나타낸다. 감도계수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} c_{zi} &= \frac{\partial z_{scanner,i}}{\partial z_i} = 1, \quad c_a = \frac{\partial z_{scanner,i}}{\partial a} = -1 \\ c_b &= \frac{\partial z_{scanner,i}}{\partial b} = -H_i, \quad c_{H_i} = \frac{\partial z_{scanner,i}}{\partial H_i} = -b, \quad c_{\delta_j} = \frac{\partial z_{scanner,i}}{\partial \delta_j} = 1 \end{aligned} \quad (21)$$

따라서 회귀계수 a 와 b 사이의 공분산을 포함한 z스캐너 구동 편차의 합성표준불확도는 다음과 같이 나타낸다.

$$u_c^2(Z_{scanner,i}) = u^2(z_i) + u^2(a) + H_i^2 u^2(b) + b^2 u^2(H_i) + 2H_i u(a, b) + \sum_{j=1}^m c_{\delta_j}^2 u^2(\delta_j) \quad (22)$$

8.3 표준불확도 성분의 계산

단차 기준시편을 이용한 원자현미경의 높이 교정과 인증 대상 시편에 대한 측정은 동일한 장비에서 온도 (23 ± 0.1) °C와 습도 (40 ± 5) % R.H.로 유지되는 환경에서 측정하였다.

(1) xy스캐너 및 직교성 보정

원자힘 현미경의 xy스캐너를 보정하기 위해 인증기관에서 인증받은 너비 시편(CRM)을 사용하여 진행하였다. 너비 기준시편의 성적서에는 인증값 P_0 와 인증값의 확장 불확도 값($k=2.56$)인 $u(P_0)$ 그리고 자유도 값을 가지고 있다.

너비 기준시편을 원자현미경을 가지고 측정을 하게 되면 인증 단차 기준시편의 평균 측정값 $\overline{P_0}$ 과 인증 단차시편의 표준불확도 $u(P_0')$ 을 갖게 된다. 따라서 보정계수와 상대 불확도는 식 (26) 과 (27) 로 표현할 수 있다.

$$\text{보정계수: } \overline{K} = \frac{P_0}{\overline{P_0}} \quad (23)$$

$$\text{상대 불확도: } \frac{u(K)}{\overline{K}} = \sqrt{\frac{u^2(P_0)}{P_0^2} + \frac{u^2(P_0')}{\overline{P_0}^2}} \quad (24)$$

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

너비 형상치수 기준물질은 동일한 장비에서 온도 (23 ± 0.1) °C로 유지되는 환경에서 측정이 이루어진다. 따라서, 설비 측정시 발생하는 x, y축의 너비 보정계수는 아래 표의 CRM을 통해 구할 수 있다.

표 8. VLSI STS2-180P CRM 인증값과 확장 불확도

순번	기준물 (VLSI STS2-180P)	인증기관	인증값 P_0 (μm)	확장 불확도 $U(P_0)$ (μm)
1	Pitch 1.8 μm	NIST	1.799	0.023
2	Pitch 3.0 μm	NIST	2.999	0.027
3	Pitch 5.0 μm	NIST	4.996	0.030

xy 너비에 따른 원자힘 현미경의 너비의 불확도를 계산하기 위해서 30 μm , 60 μm , 90 μm 에 각기 다른 FOV의 측정범위에서 스캔 방향에 따라 진행하였다. 너비 계산은 무게중심법을 통해 계산을 진행하였으며 측정된 각 축에 있는 평균 피치값의 100개 이상 평균을 통해 스캔 범위에 따른 평균값을 아래 표와 같이 구할 수 있었다.

-x축의 측정에 따른 불확도값은 다음과 같다.

표 9. VLSI STS2-180P CRM 시편의 측정범위 내 100개 x축 피치 측정값

순번	기준물 (VLSI STS2-180P)	측정범위 30 μm	측정범위 60 μm	측정범위 90 μm	평균측정값 $\overline{P_0}$ (μm)	표준불확도 $u(P'_0)$ (μm)
1	Pitch 1.8 μm	1.752	1.810	1.791	1.784	0.024
2	Pitch 3.0 μm	2.972	3.020	3.035	3.009	0.027
3	Pitch 5.0 μm	5.021	5.017	5.051	5.030	0.015

-y축의 측정에 따른 불확도값은 다음과 같다.

표 10. VLSI STS2-180P CRM 시편의 측정범위 내 100개 y축 피치 측정값

순번	기준물 (VLSI STS2-180P)	측정범위 30 μm	측정범위 60 μm	측정범위 90 μm	평균측정값 $\overline{P_0}$ (μm)	표준불확도 $u(P'_0)$ (μm)
1	Pitch 1.8 μm	1.832	1.768	1.813	1.804	0.027
2	Pitch 3.0 μm	2.972	3.030	3.061	3.021	0.037
3	Pitch 5.0 μm	5.021	4.961	5.035	5.006	0.032

KRISs	연구장비 성능평가 절차서 원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
		제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

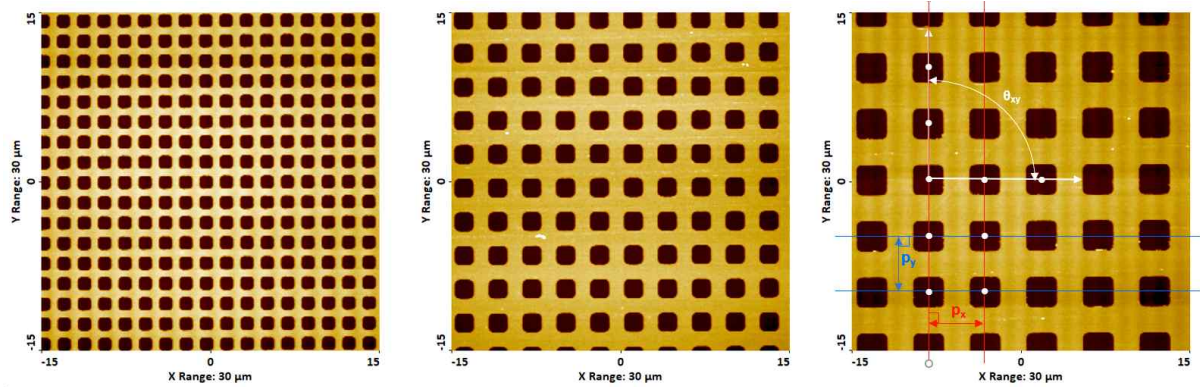


그림 22. $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ 측정범위에 대한 피치 너비에서 피치 및 직교성 측정방법
(평면격자 피치값: $1.8 \mu\text{m}$, $3.0 \mu\text{m}$, $5.0 \mu\text{m}$)

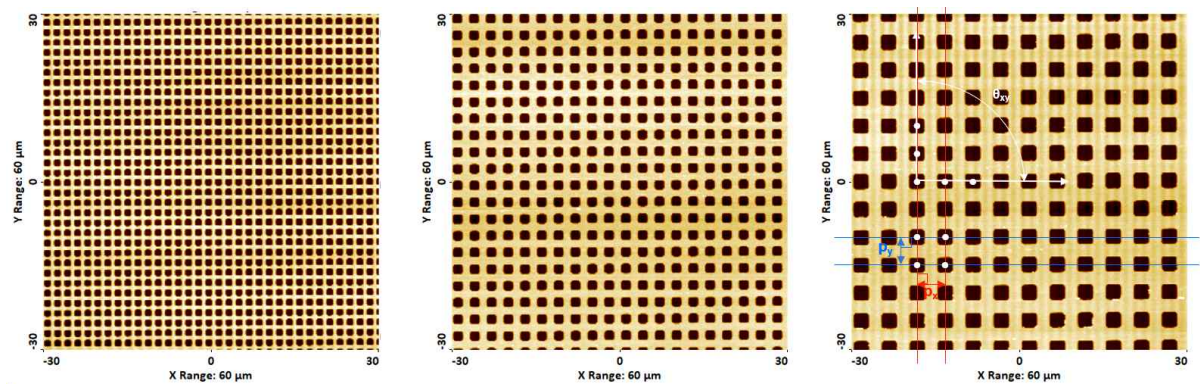


그림 23. $60 \times 60 \mu\text{m}^2$ 측정범위에 대한 피치 너비에서 피치 및 직교성 측정방법
(평면격자 피치값: $1.8 \mu\text{m}$, $3.0 \mu\text{m}$, $5.0 \mu\text{m}$)

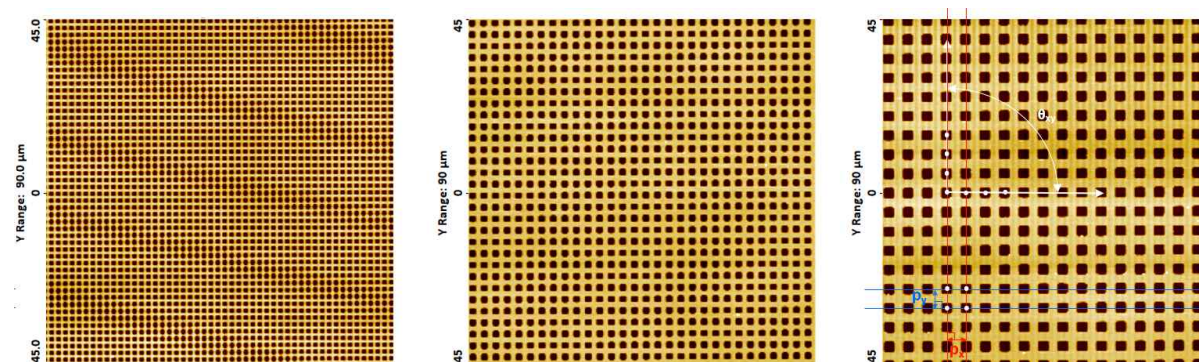


그림 24. $90 \times 90 \mu\text{m}^2$ 측정범위에 대한 피치 너비에서 피치 및 직교성 측정방법
(평면격자 피치값: $1.8 \mu\text{m}$, $3.0 \mu\text{m}$, $5.0 \mu\text{m}$)

따라서 인증 단차 값과 인증 단차 기기 측정값을 통해 원자힘 측정기 보정값과 상대 불확도비는 아래 표와 같이 구할 수 있다.

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

표 11. VLSI STS2-180P 기준물을 이용한 보정계수와 상대 불확도

순번	기준물 (VLSI STS2-180P)	측방향	보정계수 $\bar{K}$	상대 불확도 $\frac{u(K)}{\bar{K}}$
1	Pitch 1.8 μm	x 축	0.992	0.008
		y 축	1.003	0.007
2	Pitch 3.0 μm	x 축	1.003	0.008
		y 축	1.007	0.009
3	Pitch 5.0 μm	x 축	1.007	0.009
		y 축	1.002	0.007
4	설비 최종 보정값 (C_x, C_y)	x 축	1.001	0.008
		y 축	1.004	0.007

x와 y의 교정상수 C_x 와 C_y 을 구할 수 있다. 이를 통해 측정 설비의 불확도 값을 구할 수 있다. 수학적 모델을 통해 너비측정시 영향을 주는 것은 요소는 수학적 모델에서 구한 식(16)을 식(25)과 동일하게 표현이 가능하다.

$$P_x = \frac{1}{N} [(x_N - x_0)C_x + \delta p_{Abbe} + \delta p_{Drift} + \delta p_{Noise} + \delta p_{tip} + \delta p_{nl}] \frac{\cos \phi_{xy}}{\cos \theta_{sx} \cos \theta_{xz}} + \delta p_{th} + \delta p_{RoI} \quad (25)$$

여기서, 전체 거리에 영향을 주는 보정항은 $\delta p_{Abbe}, \delta p_{Drift}, \delta p_{Noise}, \delta p_{tip}, \delta p_{nl}$ 이며 N으로 나누어서 한 피치에 대한 영향성을 계산한다. 한 피치에 영향을 주는 보정항은 $\delta p_{th}, \delta p_{RoI}$ 가 되며, 각 성분에 대한 불확도 성분은 다음과 같이 정의된다. 너비의 불확도 분석은 5 μm 피치와 스캔 범위 90 μm 의 이미지를 통해서 분석을 진행하였다.

□ $u(x)$ 는 x_n 과 x_0 사이의 위치센서 분해능으로 계산된다. 직사각형분포를 통해

$$u(x) = \frac{2.746 \text{ nm}}{\sqrt{3}} = 1.585 \text{ nm}, \text{ 여기에 피치의 개수가 17개를 갖기 때문에 } N=17 \text{ 이 된다.}$$

□ $u(p_{Abbe})$ 는 센서의 측정축과 실제 측정축이 일치하지 않을 때 발생한다. 센서축과 탐침위치가 L 거리에 있다고 하고 α 만큼 기울거나 회전되어 있다고 생각하면 $\delta L_{Abbe} \approx L\alpha$ 의 오차가 발생한다. 직사각형분포를 가지기 때문에 $u(x) = \frac{12.12 \text{ nm}}{\sqrt{3}} = 6.997 \text{ nm}$ 이 된다.

$$u(x) = \frac{12.12 \text{ nm}}{\sqrt{3}} = 6.997 \text{ nm} \text{ 이 된다.}$$

□ $u(p_{Drift})$ 는 AFM 프레임의 열적 변형, 스캐너의 시간 의존적 이동, 위치 센서의 영점 변화,

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

시편과 탐침의 상대 위치 변화, 장비 내부 온도 안정화 부족으로 인해 발생이 된다. 드리프트는 $L_{Drift} = \nu_{drift} t_{measurement}$ 로 계산된다. 같은 위치에서 시간에 따른 반복 측정을 진행하여 이동량 평가를 통해 구하게 된다. 동일 위치 100회 반복시 $L_{Drift} \leq 0.1 \text{ nm}$ 로 구해진다.

□ $u(p_{Noise})$ 는 x축 위치 센서의 단기적인 신호 변동으로 표현된다. 500라인의 이미지 비교를 통한 $\delta p_{Noise} = 1.2 \text{ nm}$ 로 구할 수 있었다.

□ $u(p_{tip})$ 는 탐침 마모에 따른 형상 변화를 나타낸다. $u(p_{tip}) = \frac{0.2}{\sqrt{3}} \text{ nm} \approx 0.115 \text{ nm}$.

$c_{xtip} = \frac{1}{N} \frac{\cos \phi_{xy}}{\cos \theta_{sx} \cos \theta_{xz}}$ 도 역시 측정 시 각도들이 매우 작아서 $c_{xtip} \approx \frac{1}{N} = \frac{1}{17} = 0.059$ 로 표현된다.

□ $u(p_{nl})$ 는 피에조 스캐너의 이동량이 인가전압에 정확히 비례하지 않아서 발생하는 것을 의미한다. $u(p_{nl}) = \frac{4.028}{\sqrt{3}} \text{ nm} \approx 2.325 \text{ nm}$ 이 된다.

□ ϕ_{xy} 는 주사방향과 격자 법선 방향 사이에 각도를 나타낸다. $p_{scan} = \frac{p_{true}}{\cos \phi_{xy}}$ 로 나타내며 $p_{true} = p_{scan} \cos \phi_{xy}$ 로 표현된다. $u(\phi_{xy}) = \frac{6.1 \times 10^{-6}}{\sqrt{3}} \approx 3.52 \times 10^{-6}$ 된다.

□ θ_{xz} 는 시편의 x 방향의 기울기를 나타낸다. $u(\theta_{xz}) = \frac{5.00 \times 10^{-7}}{\sqrt{3}} \approx 2.89 \times 10^{-7}$ 된다.

□ θ_{sx} 는 센서축과 실제 x축 스캔사이에 각도 x 스캔시 완전히 평행하지 않으면 이동 거리에 변화를 하게 된다. $u(\theta_{sx}) = \frac{6.1 \times 10^{-6}}{\sqrt{3}} \approx 3.52 \times 10^{-6}$ 된다.

□ $u(p_{th})$ 는 시편 온도가 기준온도와 다르면 피치의 열팽창계수가 변화된다. $\delta p_{th} = 90 \times 2 \times 10^{-3} \times 2 \text{ nm} = 0.36 \text{ nm}$ 가 된다.

□ $u(p_{ROI})$ 는 시편의 위치별 균질도를 나타낸다. 따라서 동일 시료의 측정 위치에 따라 피치 값이 차이가 발생할 수 있기에, 여러 위치에서 반복 측정한 결과의 표준편차를 이용하여 시편의 균질성을 평가하였다. 시편의 균질성은 $u_{Probe} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{0.27}{\sqrt{100}} \text{ nm} \approx 0.027 \text{ nm}$ 로 산정하였다.

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

표 12. VLSI STS2-180P CRM 시편의 측정범위 내 x, y축 표준편차

측정범위 (μm)	x축 방향 표준편차 (nm)	y축 방향 표준편차 (nm)
30	0.024	0.027
60	0.027	0.037
90	0.015	0.032
평균값	0.022	0.032
	0.027	

- 직교성을 보정하기 위해서 측정된 이미지에서 각 격자 구조의 중심좌표에서 두 격자 벡터 p_x , p_y 를 결정한다. 무게 중심법에서 사용된 중심좌표를 통해 회귀선을 만든 후 두 벡터 사이의 측정각 θ_{xy} 를 계산한다. 그런 후 $\gamma_{xy} = \theta_{xy} - \theta_{ref}$ 로 비직교성을 계산한다. $\theta_{ref} = 90^\circ$ 이므로 $\gamma_{xy} = \theta_{xy} - 90^\circ$ 로 표현할 수 있다. 총 측정범위에 따라 각각 20개의 데이터를 통해 반복 평가를 진행하고 평균과 표준편차를 계산하였다.

표 13. VLSI STS2-180P CRM 시편의 측정범위 내 20개 축벡터 측정 각도값

순 번	기준물 (VLSI STS2-180P)	측정범위 30 μm	측정범위 60 μm	측정범위 90 μm	평균측정값 ($\overline{\theta'_{xy}}, \overline{\gamma'_{xy}}$)	표준불확도 $u(\theta'_{xy})$
1	Pitch 1.8 μm	90.22°	90.52°	90.82°	90.52° , 0.52°	0.245°
2	Pitch 3.0 μm	90.19°	90.71°	91.02°	90.64° , 0.64°	0.342°
3	Pitch 5.0 μm	90.52°	91.02°	91.32°	90.95° , 0.95°	0.329°

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

□ 피치 5 μm , 스캔 범위 90 μm 격자 시료의 불확도 표로 만들면 다음과 같다.

표 14. 피치 5 μm , 스캔 범위 90 μm 격자 시료의 불확도 표.

(직사각형 분포 불확도는 $u(x) = \frac{\text{입력값 범위}}{\sqrt{3}}$, 정규분포 불확도는 $u(x) = \text{반복측정 표준편차로 계산함}$)

불확도 요인	추정값	분포	감도계수 c_i	불확도 $u(x_i)$	불확도 기여량 $u_i(p_x) = c_i u(x_i)$
위치센서 분해능 $u(x_n) = u(x_0)$	2×16bit-DAC sensor 2.746 nm	직사각형(균등)	0.059	1.585 nm	0.093 nm
Abbe 오차 $u(p_{Abbe})$	0 (동일탐침)	직사각형(균등)	0.059	6.997 nm	0.413 nm
Drift $u(p_{Drift})$	0.1 nm	정규(가우시안)	0.059	0.1 nm	0.006 nm
위치센서 노이즈 $u(p_{Noise})$	1.2 nm	정규(가우시안)	0.059	1.2 nm	0.071 nm
탐침마모 효과 $u(p_{tip})$	0.2 nm	직사각형(균등)	0.059	0.115 nm	0.007 nm
센서 비선형 $u(p_{nl})$	4.028 nm	직사각형(균등)	0.059	2.325 nm	0.137 nm
격자 정렬각 (직교성), $u(\phi_{xy})$	0.2°	직사각형(균등)	5,030 nm	3.52×10^{-6}	0.017 nm
시편 기울기 각도 (틸트), $u(\theta_{xz})$	0.0573°	직사각형(균등)	-5,030 nm	5.00×10^{-7}	0.003 nm
센서축과 주사축 각도 $u(\theta_{sx})$	0.2°	직사각형(균등)	-5,030 nm	3.52×10^{-6}	0.017 nm
열팽창 $u(p_{th})$	2 K	정규(가우시안)	1	0.004 nm	0.04 nm
시편의 위치 균질도 $u(p_{Rol})$	0.27 nm (100회)	정규(가우시안)	0.997	0.0027 nm	0.0027 nm
			$u(p_x)$		2.466 nm
			k		2
측정결과(p_x)		5.030 μm	$U(k=2)$		4.932 nm

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

(2) z스캐너 보정

원자힘 현미경의 z스캐너를 보정하기 위해 인증기관에서 인증받은 단차 기준 시편(CRM)을 사용하여 진행하였다. 단차 기준시편의 성적서에는 인증값 H_0 와 인증값의 확장 불확도 값 ($k=2$)인 $u(H_0)$ 그리고 자유도 값을 가지고 있다.

단차 기준시편을 원자현미경을 가지고 측정을 하게 되면 인증 단차 기준시편의 평균 측정값 $\overline{H_0}$ 과 인증 단차시편의 표준불확도 $u(H_0')$ 을 갖게 된다. 따라서 보정계수와 상대 불확도는 식 (26) 과 (27) 로 표현할 수 있다.

$$\text{보정계수: } \overline{K} = \frac{H_0}{\overline{H_0}} \quad (26)$$

$$\text{상대 불확도: } \frac{u(K)}{\overline{K}} = \sqrt{\frac{u^2(H_0)}{H_0^2} + \frac{u^2(H_0')}{\overline{H_0}^2}} \quad (27)$$

단차 기준시편과 인증 대상 시편은 동일한 장비에서 온도 (23 ± 0.1) °C로 유지되는 환경에서 측정이 이루어지기 때문에 설비 측정시 발생하는 불확도는 다음과 같이 구할 수 있다. 단차 측정시 발생하는 원자힘 현미경 반복측정 불확도 요인 $u(z_{tool})$ 은 식 (28) 에서 보듯이 z축 측정 센서의 노이즈 $u(z_{noise})$, 분해능 $u(z_{resolution})$, 측정환경 온도에 의한 z-piezo tube scanner의 변화 $u(z_{thermalexpansion})$ 로 나타낼 수 있다.

$$u(z_{tool}) = \sqrt{u(z_{noise})^2 + u(z_{resolution})^2 + u(z_{thermalexpansion})^2} \quad (28)$$

원자힘 현미경의 z축 배율 교정으로 사용되는 명목단차 100 nm 와 110 nm의 단차 기준시편의 성적서에 나타난 인증값과 확장 불확도($k=2$)는 아래 표와 같다.

표 15. 단차 기준 시편(CRM) 인증값과 확장 불확도

순번	기준물	인증기관	인증값 H_0 (nm)	확장 불확도 $U(H_0)$ (nm)
1	VLSI STS2-1000P	NIST	100.8	1.5
2	TipsNano TGZ2	PTB	110.12	1.98

$$*u(H_0) = \sqrt{u(H_{NMI \text{ tool report of Cal.}})^2 + u(H_{VLSI \text{ or TipsNano tool report of Cal.}})^2 + u(H_{\text{sample repeatability}})^2 + u(H_{\text{sample uniformity}})^2}$$

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

원자힘 현미경의 단차 측정값과 불확도는 원자현미경 z축 측정 센서에 의한 설비 불확도값에 인증 시편의 불균일성과 측정기 반복도로 구할 수 있다. 식 (29) 에서 보듯이 $u(H'_0)$ 는 단차 기준시편 측정값의 표준불확도이며 설비 측정에 의한 불확도 $u(z_{tool})$ 와 시편의 불균일성 $u(H'_{0_Uni})$ 과 측정기 반복도 $u(H'_{0_Rep})$ 로 구성된다.

$$u(H'_0) = \sqrt{u^2(z_{tool}) + u^2(H'_{0_Uni}) + u^2(H'_{0_Rep})} \quad (29)$$

xy 측정범위가 90 μm 인 원자힘 현미경의 설비 불확도 중 동일 위치에서 100회 이상의 측정을 통한 z축 측정 센서의 노이즈에 의한 불확도 $u(z_{noise})$ 는 다음과 같다.

표준불확도 : $u(z_{noise}) = 0.362 \text{ nm}$

확률분포 : 정규분포

자유도 : ∞

xy 측정범위가 90 μm 인 원자힘 현미경의 측정 센서의 분해능에 의한 불확도 $u(z_{resolution})$ 는 다음과 같다.

표준불확도 : $u(z_{resolution}) = \frac{0.2}{\sqrt{3}} \text{ nm} = 0.115 \text{ nm}$

확률분포 : 직사각형

자유도 : ∞

xy 측정범위가 90 μm 인 원자힘 현미경의 사용되는 piezo tube scanner는 lead zirconate titanate ($\text{Pb}[\text{Zr}(x)\text{Ti}(1-x)]\text{O}_3$, PZT)로 사용되는 물질로 z축의 coefficient of thermal expansion(CTE)값은 $d_{31} = \sim 11 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 가지고 있다. 따라서 100 nm 단차를 측정시 온도 측정 변화에 따른 변화율은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{표준불확도 : } u(z_{thermal\ expansion}) &= d_{31} \times \Delta Temp. \times Z-PZT\ distance \\ &= \frac{11 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \times 0.1 \times 100}{\sqrt{3}} \text{ nm} \\ &= 6.351 \times 10^{-5} \text{ nm} / ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

확률분포 : 직사각형

자유도 : ∞

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

기준시편의 5곳에서 측정한 단차 측정값의 표준편차(σ)에 의한 시편의 불균일성에 의한 표준불확도, 확률분포, 자유도는 아래와 같고 측정한 값을 아래 표와 같이 정리하였다.

$$\text{표준불확도: } u(H'_{0_Uni}) = \frac{\sigma_{\text{측정값}}}{\sqrt{5}}$$

확률분포: t -분포

자유도: 4

표 16. 단차 표준시편의 불균일성 측정표준편차 및 불확도

순번	기준물	확률분포	자유도	측정표준편차 σ (nm)	표준불확도 $u(H'_{0_Uni})$ (nm)
1	VLSI STS2-1000P	t -분포	4	0.381	0.170
2	TipsNano TGZ2	t -분포	4	0.388	0.174

기준시편의 단차 측정값으로 측정시 시편의 동일 위치에서 100회 반복 측정을 하였다. 이를 통해 측정기의 반복도의 표준 편차(σ)의 표준불확도, 확률분포, 자유도는 아래와 같고 측정한 값을 아래 표와 같이 정리하였다.

$$\text{표준불확도: } u(H'_{0_Rep}) = \sigma_{\text{측정값}}$$

확률분포: 정규분포

자유도: ∞

표 17. 단차 표준시편의 반복도 측정표준편차 및 불확도

순번	기준물	확률분포	자유도	측정표준편차 σ (nm)	표준불확도 $u(H'_{0_Rep})$ (nm)
1	VLSI STS2-1000P	정규분포	∞	0.482	0.482
2	TipsNano TGZ2	정규분포	∞	0.470	0.470

xy 측정범위 90 μm 인 원자힘 현미경을 통한 단차 기준시편 측정 불확도는 식 (29) 에서 보는 것처럼 $u(H'_0)$ 로 표현될 수 있으며 표준불확도, 확률분포, 자유도는 아래와 같고 측정한 값을 아래 표와 같이 정리하였다.

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

$$\text{표준불확도: } u(H'_0) = \sqrt{u^2(Z_{tool}) + u^2(H'_{0_Uni}) + u^2(H'_{0_Rep})} \quad (30)$$

$$u(Z_{tool}) = \sqrt{u(Z_{noise})^2 + u(Z_{resolution})^2 + u(Z_{thermal\ expansion})^2}$$

확률분포: 정규분포

$$\text{자유도: } \nu_{H'_0} = \frac{u(H'_0)^4}{\frac{u(Z_{tool})^4}{\infty} + \frac{u(H'_{0_Uni})^4}{4} + \frac{u(H'_{0_Rep})^4}{\infty}}$$

표 18. 단차 표준시편의 평균값 및 표준불확도

순번	기준물	확률분포	자유도	측정표준편차 $\overline{H'_0}$ (nm)	표준불확도 $u(H'_0)$ (nm)
1	VLSI STS2-1000P	정규분포	789	100.972	0.637
2	TipsNano TGZ2	정규분포	683	110.877	0.629

따라서 인증 단차값과 시험기기 측정값 비교에 의한 원자힘 현미경 보정값과 상대 불확도는 아래 표와 같이 구할 수 있다.

표 19. 단차 표준시편을 사용한 측정기의 보정계수와 상대 불확도

순번	기준물	보정계수 $\overline{K}$	상대 불확도 $\frac{u(K)}{\overline{K}}$
1	VLSI STS2-1000P	0.998	0.009
2	TipsNano TGZ2	0.996	0.009
3	설비최종 교정값	0.997	0.009

	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-AFM-001-2026
		제·개정번호	01
	원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 좌표축 직교성 성능평가 절차서	제정일	2026.09.02
		최종 개정·확인일	2026.09.02

9. 평가 결과서 작성방법

9.1 교정 결과 레포트

평가 결과서에 일반적으로 포함해야 할 사항은 다음과 같다.

- (1) 평가기관명 및 의뢰기관명
- (2) 평가번호
- (3) 평가일자
- (4) 평가환경 (온도, 습도, 진동)
- (5) 평가 대상 AFM 장비의 제작사, 모델 및 일련 번호
- (6) AFM 측정에 사용되는 표준 물질 제작사와 인증값
- (7) 교정에 사용되는 모델 명시
- (8) 측정 시 AFM 측정 조건
- (9) 평가에 사용한 시험절차서명 또는 방법
- (10) 평가결과
- (11) 기타 의견 및 참고사항

10. 유효성 검증방법

- ☒ 교정용 표준기 또는 인증표준물질 이용
- ☐ 다른 교정·시험, 표준물질제조 인증방법으로 획득한 결과와의 비교
- ☐ 교정/시험기관 간 비교 및 숙련도 시험
- ☒ 결과에 영향을 미치는 요인에 대한 체계적인 검토
- ☒ 결과에 대한 측정불확도 평가
- ☐ 기타 유효화 방법 _____

[별첨] 성적서 작성 예시

[별첨 1] 연구장비 성능평가 결과서 작성 예시

[별첨 2] 연구장비 성능평가 결과서 표지 예시

[별첨1] 연구장비 성능평가 결과서 작성 예시

연구장비 성능평가 결과서

PERFORMANCE EVALUATION REPORT

평가번호(Cer. No.) :2026-AFM-01

(2) 쪽 중 (1) 쪽~

1. 의뢰기관

기관명 : ###

주 소 : ###

2. 평가대상

제작회사 : ###

모 델 명 : ###

3. 평가일자 : 20##. ##. ## ~ 20##. ##.

4. 평가내용

평가품명 : 원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 직교성 성능 평가

평가장소 : ☐ 성능평가실험실 ☐ 현장

평가환경 : 온도 : (23.0 $\pm$ 0.4) °C 상대습도 : (36 $\pm$ 2) %

평가방법 : 한국표준과학연구원 발행 “원자힘 현미경의 스캐너 구동 편차 및 직교성 성능평가 절차서”를 준수하여 수행하였다.

5. 사용장비

- 원자힘 현미경 (Bruker Icon Dimension)

- xy축 VLSI STS2-180P, NIST Certified

- z축 VLSI STS2-1000P, NIST Certified

6. 평가결과 : 다음 쪽 “평가 결과” 참고

확인	작성자 :	승인자
	직 위 :	직 위 :
	성 명 : (서명)	성 명 : (서명)

위 평가결과는 2026년 과학기술정보통신부 과학기술사업화진흥원의 “연구산업육성사업(연구산업체계구축) 연구장비 성능평가 위탁사업”으로 수행한 것입니다.

한국표준과학연구원장

대전시 유성구 가정로 267, 042-868-5000

연구장비 성능평가 결과서

PERFORMANCE EVALUATION REPORT

평가번호(Cer. No.) :2026-AFM-01

(2) 쪽 중 (2) 쪽

평 가 결 과

■ xy 스캐너 구동 편차

- 3종의 격자 기준물에 대한 x축 방향 피치 측정값 및 불확도는 다음과 같다.

순 번	격자 기준물	측정값 $\overline{P'_0}$ (μm)	표준불확도 $u(P'_0)$ (μm)
1	Pitch 1.8 μm	1.784	0.024
2	Pitch 3.0 μm	3.009	0.027
3	Pitch 5.0 μm	5.030	0.015

- 3종의 격자 기준물에 대한 y축 방향 피치 측정값 및 불확도는 다음과 같다.

순 번	격자 기준물	측정값 $\overline{P'_0}$ (μm)	표준불확도 $u(P'_0)$ (μm)
1	Pitch 1.8 μm	1.804	0.027
2	Pitch 3.0 μm	3.021	0.037
3	Pitch 5.0 μm	5.006	0.032

- 시험대상 장비 수평축 구동 보정계수 및 상대 불확도

순번	장비 보정계수	축 방향	보정계수 $\overline{K}$	상대 불확도 $\frac{u(K)}{\overline{K}}$
1	수평축 보정계수 (C_x, C_y)	x 축	1.001	0.008
		y 축	1.004	0.007

연구장비 성능평가 결과서

PERFORMANCE EVALUATION REPORT

평가번호(Cer. No.) :2026-AFM-01

(2) 쪽 중 (2) 쪽

평 가 결 과

■ z축 스캐너 구동 편차

- 단차 기준시편에 대한 z축 방향 단차 측정값 및 불확도는 다음과 같다.

순번	기준물	측정값 $\overline{H'_0}$ (nm)	표준불확도 $u(H'_0)$ (nm)
1	VLSI STS2-1000P	100.972	0.637
2	TipsNano TGZ2	110.877	0.629

- 시험대상 장비 z축 구동 보정계수 및 상대 불확도

순번	장비 보정계수	보정계수 $\overline{K}$	상대 불확도 $\frac{u(K)}{\overline{K}}$
1	z축 보정계수 C_z	0.997	0.009

연구장비 성능평가 결과서

PERFORMANCE EVALUATION REPORT

평가번호(Cer. No.) :2026-AFM-01

(2) 쪽 중 (2) 쪽

평 가 결 과

▣ 좌표축 직교도

- 시험대상 장비 XY 스캔축 각도 교정값 및 불확도

순번	XY 스캔축 각도 기준값	교정값	표준 불확도
1	90°	90.70°	0.305°

끝(End of the report).

[별첨 2] 연구장비 성능평가 결과서 표지 예시

연구장비 성능평가 결과서

연구장비성능평가 장비명	
신청 기업명	

20XX년 00월 00일



이 문서는 「연구산업진흥법」 제8조제1항 및 같은 법 시행령 제10조제3항에 따른 연구장비성능평가 결과서로 평가기관의 사전승인 없이는 문서의 일부분만을 발췌·인용하여 사용하거나 배포할 수 없습니다.

<목 차>

1. 성능평가 개요
 - 1.1. 성능평가 장비의 개요 및 구성
 - 1.2. 성능평가 수행 일정
2. 성능평가 신청 정보
 - 2.1. 성능평가 신청 개요
 - 2.2. 성능평가 세부 사양서
 - 2.3. 성능평가 항목 제안서
3. 성능평가 항목 및 항목별 기준
4. 성능평가 수행 방법 및 절차
5. 성능평가 결과
6. 최종 결론
7. 참고 문헌
8. 특이사항

※ 성능평가 신청 장비의 유형·특성에 따라 결과서의 목차는 일부 변동될 수 있습니다.