

## 주사전자현미경 성능평가 절차서

### - Performance Evaluation Procedure of Scanning Electron Microscope -

KRISs	주사전자현미경 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-SEM-001-2022
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정확인일	2022.12.9.

☐ 성능평가 절차서 담당부서: 소재융합측정연구소 EM나노메트론폴로지팀 /  
첨단측정장비연구소 연구장비성능평가팀

☐ 절차서 작성자 : 박병천 / 박인용

☐ 제 · 개정 이력 내역

구분	제·개정번호	최종 개정·확인일자	제·개정 내용 요약
제정	00	2022. 12. 9.	ISO/IEC 17025의 요건에 따라 제정

☐ 절차서 목차

서론	
1. 적용 범위 .....	7
2. 인용 표준 .....	7
3. 용어 및 정의 .....	7
4. 일반 사항 .....	10
5. 영상 배율 교정 .....	13
6. 영상 분해능[선명도] 평가 .....	22
7. 기타 .....	37
[별첨 1] 성능평가 결과서 작성 예시 1 .....	
[별첨 2] 성능평가 결과서 작성 예시 2 .....	
[별첨 3] 성능평가 결과서 작성 예시 3 .....	
[별첨 4] 연구장비성능평가 결과서 표지 예시 1 .....	

KRISs	주사전자현미경 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-SEM-001-
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정확인일	2022.12.9.

## 서론

이 문서는 주사전자현미경 (Scanning Electron Microscope, 이하 SEM) 영상배율image magnification 교정 및 영상 분해능[선명도] 평가에 관한 절차서이다.<sup>1)</sup>

SEM은 사용하기 쉽고 나노 수준의 영상을 빨리 얻을 수 있다. 이제 SEM은 마이크로/나노 물체의 모양 및 표면관찰뿐 아니라, 길이와 각도 등의 치수측정에도 널리 쓰인다. 정량적인 측정을 하려면, SEM은 필요한 적격성qualification을 갖춰야 한다. 영상이 선명해야 하고, 드리프트 및 왜곡이 없어야 하며, 전자빔-유발 오염이 적고, 배율이 정확하며, 배경잡음이 작고, 전자빔 전류가 충분히 커야 한다.

특히 정량적 측정을 위하여 SEM이 제작자의 사양 및 사용자의 목적에 맞는지 확인하려면 여러 성능변수 값들을 알아야 한다. 이 값들은 켜 치수의 측정불확도를 평가하고 기기를 재조정하며 수리 필요성 여부를 평가하는 데 유용하다.

분해능[선명도]와 영상 배율 정확도는 SEM을 대표하는 성능이다. 두 성능은 주로 광학계optics와 주사계scanner의 성능을 나타내는 척도가 될 수 있기 때문이다.

먼저, 배율교정은 SEM 영상 기반의 크기 및 모양 측정에 필수적이다. 사용하는 측정 조건 조합에 대한 영상배율군의 정확도 평가에 앞서 영상의 선형성과 직각도를 검사하는 것이 권장된다.

입사전자빔 주사의 선형성이 떨어지면, 크기가 알려진 물체의 크기와 모양이, 영상 내 위치에 따라 다르게 보인다. 에지 부분과 가운데 부분의 배율이 다르다. 이러한 왜곡은 특히 코일-기반의 빔 주사를 쓰는 SEM에서 잘 발생하고, 정량적 측정 시 상당한 오차를 초래할 수 있다. 왜곡은 보통, 전자회로에 문제가 있어 일어난다. 전자회로에 기인하는 이러한 왜곡들은 특히 고속주사나 저배율 관찰에서 잘 발견된다. 선형성이 안 좋은 영역은 쓰지 않은 것이 좋다.

주사신호는 XY신호이다. X주사와 Y주사는 이상적으로 직각이어야 하나, X코일과 Y코일이 정확히 직각으로 놓여 있지 않으면 XY 주사가 서로 영향을 주게 된다. 이럴 경우 사각형을 결상하면 평행사변형의 영상이 얻어지는 등 상 왜곡이 발생한다. 다시 말해서 직각이 더 이상 직각이 아니다. 따라서 선형성과 직각도가 나쁘면 크기와 모양

1) 분해능[선명도]은 흔히 금/탄소 입자 시료의 영상을 얻은 후, 수동으로 또는 컴퓨터를 써서 입자 간 식별 가능한 최소간격 또는 선명도 (용어정의 3.19)로 나타낸다.

KRISs	주사전자현미경 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-SEM-001- 2022
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정확인일	2022.12.9.

측정이 부정확해질 뿐 아니라, 정밀한 배율교정 자체가 불가능하거나 가치가 떨어지게 된다. 그러므로 선형성과 직각도 검사하는 SEM 장비의 성능을 평가하는 목적 외에도 배율교정의 정당성을 확보하는 의미를 갖는다.

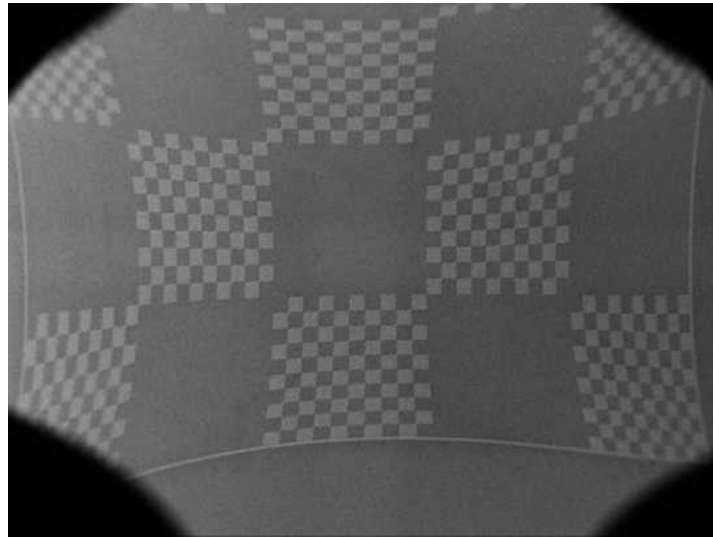


그림 1. 선형성이 안 좋은 영상 예: 정사각형 체스chessy 패턴의 저배율 영상. 반듯해야 할 패턴이 휘어져 보인다.

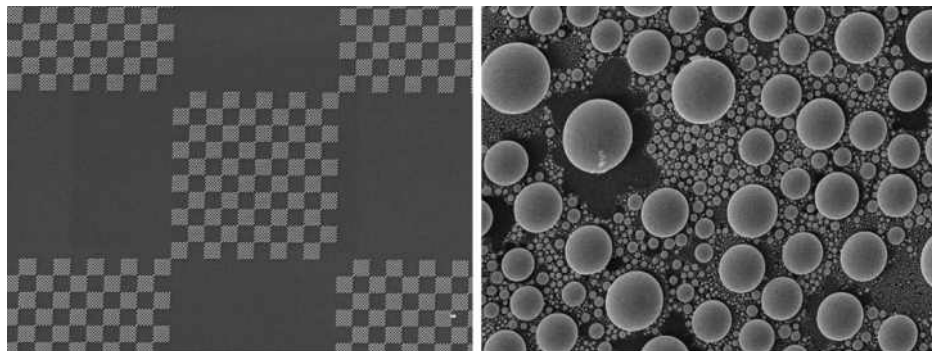


그림 2. 직각도가 부정확한 영상: (왼쪽) 정사각형 체스chessy 패턴이 약간 기울어져 보인다. (오른쪽) 공이 약간 계란처럼 되어 누워 있다.

배율은 출력장치 화면(예: 모니터)의 크기를, 시료 위 전자프로브의 주사영역의 크기로 나눈 값이다. 배율은 확대 비율로써 자연수로 표시되며, 흔히 “x” 기호와 함께 나타낸다. 즉, 100x, 10 000x, 10kx, 또는 x100, x10 000, x10k, 이런 식이다. 이 배율은 SEM 영상 안에 함께 기록된다. 또한 길이가 명시된 척도막대나 영상너비Horizontal Field Width (HFW)로 나타내기도 한다. 영상너비는 영상을 수평으로 가로지르는 길이이다.<sup>2)</sup>

KRISs	주사전자현미경 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-SEM-001-
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정확인일	2022.12.9.

배율을 교정한다는 것은 영상 내 척도막대의 정확한 길이를 알아내는 것이다. 동등하게, 영상너비를 결정하는 것이다.

출력장치 화면의 크기가 달라지면 배율이 달라진다. 본 절차서가 준용하는 인용표준 ①에 따르면 영상 내 척도막대 (또는 영상너비)의 길이 (또는 화면의 수평 너비)와 재고자 하는 물체의 길이를 자로 재고 그 비로로부터 물체의 크기를 계산한다. 정확한 정량적 측정이 요구되거나, 디지털 영상에서 화소수를 따지며 작업하는 데는 이러한 방식이 불편하며 오히려 불리할 수 있다.

이제 거의 모든 SEM 영상은 디지털 영상을 생산하므로 배율보다는 SEM 영상의 화소 크기로 소통하는 것이 더 편리하고 과학적이다. 화소 크기가 정확히 결정되고 나면, 영상 내 물체의 크기에 해당하는 화소수를 세고, 그 화소수에 화소크기를 곱하여 실제 물체의 크기를 구할 수 있다. 화소수는 SEM 장비 자체 또는 외부의 영상처리 소프트웨어를 써서 쉽게 셀 수 있어서, 화소크기를 곱해 크기를 알아낸다. 따라서 본 절차서는, 극히 일부의 SEM에 대한 적용을 포기하고, 화소크기를 교정하는 방식을 취했다.

척도막대의 길이, 영상너비, 배율, 화소크기는 궁극적으로 같은 양을 나타내지만, 서로 일치하지 않을 수 있고, 실제 영상배율과 다를 수도 있다. 만일 배율이 사용자가 설정한 허용치를 초과할 경우 시료 장착 상태 및 SEM 자체의 오정렬을 점검해야 하며, 재조정하고 교정을 다시 한다. 디지털 영상에서 척도막대는 실제로는 영상 내 물체의 크기를 대충 가늠할 때 쓰이며, 정량측정을 위해서는 영상처리 소프트웨어를 사용한다.

기본적으로 격자모양의 표준물질(RM)이나 인증표준물질 (CRM)을 이용하여 배율을 교정한다. 선형성과 직각도도 격자시편<sup>3)</sup>을 이용하여 검사할 수 있다. 그런데 SEM 배율은 전자빔의 주사 특성에 영향을 받으므로, 가속전압, 선택 배율 (주사 범위 또는 영상 시야각), 작업거리에 따라 달라질 수 있다. 그러므로 표준시료는 시료와 같은 측정 조건에 놓고 실시하는 것이 좋다. 배율에 영향을 주는 변수들의 더 포괄적인 목록은 인용표준 ②의 부록 B를 참조하기 바란다.

이 절차서는 1차원 격자를 이용하여 SEM의 배율 및 선형성을, 2차원 격자를 이용하여 SEM의 배율, 선형성 및 직각도를 평가하는 방법을 명시하였다.

2) 영상너비=화소크기 x 영상의 가로크기 (화소수)

3) 직각도는 2차원 격자를 사용한다.

KRISs	주사전자현미경 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-SEM-001-
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정확인일	2022.12.9.

ISO 16700:2016 (2. 인용표준 ①)은 SEM 영상배율교정에 관한 국제표준문서로써, 격자 피치를 이용하여 영상 내 척도막대를 교정하는 지침을 적고 있다. CRM은 사용 배율 및 요구되는 정확도에 따라 선택하며, 이 국제규격의 목적은, 교정 정확도를 최소 10%보다 좋게 하는 것이다. 이 절차서의 여러 곳에서 ISO 16700의 해당 부분을 인용하였음을 밝혀 둔다. 그러므로 이 절차서에 따라 영상배율을 교정했다면 ISO 문서에 따랐다고 해도 무리가 없을 것이다.

이 절차서는 디지털 영상을 취급하고 있으나, 필름 영상도 마찬가지로 개념으로 적용할 수 있다. 영상처리 프로그램을 사용하면 사람의 눈에 기대지 않아, 객관적인 결과를 얻을 수 있다. 하지만 격자 패턴의 에지-에지나 중심-중심의 위치결정 오차는 일반적으로 작아서 수동 측정을 하더라도 결과는 동일하다고 보아도 무방하다.

SEM의 관찰 및 작동조건이 일반적이지 않을 수 있다. 이 경우에도 여기에서 설명한 절차를 써서 실제 배율을 교정하면 유용할 것이다.


다음, 분해능[선명도]은 SEM의 가장 대표적인 성능으로, SEM 전반에 대한 평가지표이다. 사용하는 SEM의 가속전압, 배율, 작업거리, 개구 지름, 프로브 전류, 검출기 등은 모두 분해능[선명도]에 영향을 준다. 그러므로 실제 사용하는 SEM 작동 조건별로 분해능[선명도]을 알아야 한다. ISO TS 24597는 SEM 분해능[선명도] 시험 관련 국제표준문서로써, 영상의 디지털 처리를 통해 분해능[선명도]를 구하기 위한 지침과 3 가지 계산 알고리즘 - 푸리에 변환법, 대비-대-구배 법, 미분법 - 을 제시하고 있다. 알고리즘은 사람의 눈에 기대지 않고 객관적인 절차를 따라 정량적인 결과를 주기 위한 것이다. 이 중에서 미분법은 사람이 영상의 분해능[선명도]를 인식하는 방식과 가장 유사하고, 실제로 이 방법을 쓰는 SEM 업체들이 늘어날 것으로 보인다. 본 절차서는, ISO TS 24597의 미분법에 기반하여 SEM 영상 분해능[선명도]를 계산하는 절차를 적었다. 이 절차서의 여러 곳에서 ISO 24597 의 해당 부분을 인용하였다. 2 개 이상의 알고리즘에 의해 분해능[선명도]를 계산하고, 비교하는 것이 이상적이지만, 현재는 미분법 기반 프로그램만 개발되어 있다. 앞으로 푸리에 변환법에 기반하여 프로그램이 개발되면 절차서를 개정할 예정이다. 이 절차에 따르면 분해능[선명도]는 기본적으로 화소크기 단위로 주어진다. 만일 영상배율, 즉 화소크기가 교정되어 있고, 교정의 미터 소급성이 입증된 경우, 길이 단위인 nm 로도 환산할 수 있다.

이 절차를 적절한 주기로 수행하여 SEM의 성능을 확인하는 것은 중요하다. 재현성의 결여나 치우침bias의 발견은 기기 및 환경의 안정성에 대한 중요한 정보가 될 수 있기 때문이다.

KRISs	주사전자현미경 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-SEM-001-
			2022
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정 확인일	2022.12.9.

절차서의 용어와 개념은 ISO 문서 등 관련 규격서들과 일관성을 유지하기 위해 노력하였다.

절차서는 SEM의 배율교정과 분해능[선명도] 평가절차의 2부분으로 구성되어 있다. 배율교정은 다시 교정 방법, 교정불확도 산정, 결과서 작성으로 나뉘고, 분해능[선명도] 평가는 평가방법, 분해능[선명도] 계산 알고리즘의 유효성 검증, 평가보고서 작성으로 나누었다. 부록에는 영상 배율교정 성능평가 결과서의 두 가지 예와 분해능[선명도] 성능평가 결과서의 한가지 예를 실었다.

	<b>주사전자현미경 성능평가 절차서</b>	절차서 등록번호	PE-SEM-001-
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정확인일	2022.12.9.

## 1. 적용범위

이 시험절차는 피치가 알려진 격자시료를 써서 디지털 SEM 영상의 배율을 교정할 때 적용할 수 있다.

## 2. 인용표준

- ① Microbeam analysis - Scanning electron microscopy - Qualification of the scanning electron microscope for quantitative measurement, ISO/TS 21383:2021.
- ② Microbeam analysis - Scanning electron microscopy - Guidelines for calibrating image magnification, ISO 16700:2016. 또는  
마이크로빔-주사전자현미경-영상배율교정지침, KS D ISO 16700:2013.
- ③ Microbeam analysis - Scanning electron microscopy - Methods of evaluating image sharpness, ISO/TS 24597:2011(E)<sup>4)</sup>
- ④ International vocabulary of metrology - Basic and general concepts and associated terms (VIM), JCGM 200:2012
- ⑤ Microbeam analysis - Scanning electron microscopy - Vocabulary, ISO 22493, :2014(E) 또는 마이크로빔 분석-주사전자현미경-용어, KS D ISO 22493:2012
- ⑥ 측정불확도 표현 지침, KRIS-98-0096-SP, 1998. 10.

## 3. 용어 및 정의

### 3.1 주사전자현미경scanning electron microscope

잘 모아진 전자빔으로 시료의 표면을 주사하면서, 표면에서 튀어나오는 신호전자를 이용하여, 시료의 확대 영상을 생성하는 장치

### 3.2 영상image

SEM이 만드는 시료 표면의 2차원 표현

### 3.2 영상 크기image size

SEM이 만드는 시료 표면의 2차원 표현

4) ISO/TS 24597은 2010년 기한 10년의 출판 승인을 받았으며, 2019년 기한이 3년 더 연장되었다. 현재 TC202/SC4의 한 작업반에서 미분법에 대한 새 문서를 준비중에 있다.



KRISs	주사전자현미경 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-SEM-001-
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정 확인일	2022.12.9.

### 3-5 영상너비horizontal field width

SEM 영상의 가로방향 길이

### 3-5 영상높이vertical field width

SEM 영상의 세로방향 길이

### 3-5 화소pixel

디지털 SEM 영상의 최소 불가분의 영상-구성 단위

### 3-6 화소크기pixel size

SEM 영상 화소에 해당하는 시료영역의 크기 (단위: nm)<sup>5)</sup>

### 3.3 영상배율image magnification

주사 표시 화면의 길이 대對 해당 시료 주사영역 길이의 비

### 3.4 척도막대scale marker

시료 내 지정된 실제 길이를 나타내는 영상 내 선 또는 발생 선(구간)

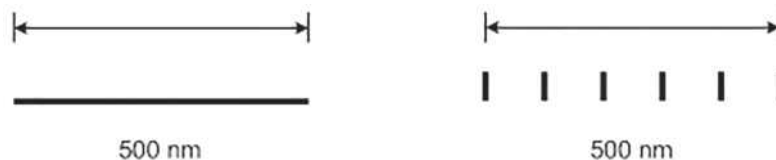


그림 3. 척도막대와 막대길이 표시값 (출처: ISO 16700 Figure 2)

### 3.5 표준물질reference material (RM)


명시한 특성 한 개 또는 그 이상에 대하여 충분히 균질하고 안정하여, 측정 과정에서 의도한 용도로 쓸 수 있도록 확정된 물질

### 3.6 인증표준물질certified reference material (CRM)

명시된 특성 한 개 또는 여러 개가, 측정학적으로 유효한 절차로 결정되어 있고, 특성값, 연관 불확도 그리고 측정학적 소급성이 명시된 표준물질 인증서가 수반된, 표준물질 (RM)

### 3.7 교정calibration

5) 화소의 가로, 세로 길이는 같아야 한다.

	<b>주사전자현미경 성능평가 절차서</b>	절차서 등록번호	PE-SEM-001-
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정확인일	2022.12.9.

특정조건에서, SEM이 표시하는 배율과, RM이나 CRM으로 결정한 해당 배율 간 관계를 확정하는 작업

### 3.8 가속전압accelerating voltage

전자원에서 방출된 전자를 가속하기 위해 음극의 방출팁과 양극사이에 걸어 주는 전위차

### 3.9 경사각tilt angle

전자빔 축과 수직한 평면으로부터 기울인 시료표면의 각도

### 3.10 영상 장치Display

영상의 가시화를 위해 쓰는 아날로그 또는 디지털 장치

### 3.11 작업 거리working distance

시료 표면과 SEM 대물렌즈 바닥면 간의 거리

### 3.12 피치pitch

시료 위 유사한 두 모양 - 반복 패턴의 대응점들 - 간의 가장 가까운 간격.

### 3.13 정확도

시험 결과와 인정된accepted 기준값이 일치하는 정도

### 3.14 이차전자Secondary electron

입사전자가 시료와 비탄성충돌하여 시료로부터 방출되는 전자. 검출기는 낮은 (관례적으로 50 eV 미만) 에너지를 가진 전자를 이차전자로 보고 수거한다. 본 절차서에서 언급하는 영상은 기본적으로 이차전자 영상이다.

### 3.15 후방산란전자Back scatter electron

입사전자가 시료와 탄성충돌한 후 시료로부터 방출되는 전자.


### 3.16 이진 영상Binary image

두 개의 밝기 값만 가지는 SEM 변환 영상

### 3.17 합성곱 영상

2차원 가우시안 곡선에 의한 SEM 이진 영상의 합성곱 영상

### 3.18 분해능[선명도] 인자Sharpness factor

	<b>주사전자현미경 성능평가 절차서</b>	절차서 등록번호	PE-SEM-001-
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정 확인일	2022.12.9.

합성곱 영상을 만들 때 쓰인 가우스 곡선의 폭, 즉, 표준편차의 2 배 ( $2\sigma$ )

### 3.19 영상 분해능[선명도]Image sharpness

분해능[선명도] 인자를 2 의 제곱근으로 나눈 값 (즉,  $2\sigma/\sqrt{2}$ ), SEM 영상의 분해능[선명도] 인자는 표준편차가  $\sigma$  인 가우스 곡선으로 생성된 합성곱 영상의 분해능[선명도] 인자와 같다.

### 3.20 대비-대-잡음비Contrast-to-noise ratio, CNR

$I_A - I_B$  와  $\sigma_n$  의 비. 여기서  $I_A$  와  $I_B$  는 물체와 배경의 영상 세기이고  $\sigma_n$  은 영상 잡음의 표준편차

### 3.21 미분법Derivative method, DR법

SEM 영상 내 입자들의 여러 방향의 에지곡선들에 오차함수를 맞추어 영상 분해능 [선명도]를 평가하는 방법

### 3.22 시야각Field of view

SEM 영상의 전체크기에 해당하는 시료 영역

이 밖에 ISO 16700, ISO 22493 에 나오는 용어 및 정의가 사용되었다.

## 4. 일반사항

### 4-1. 평가 환경

SEM 장비 자체의 성능평가를 위해서는 환경 및 유틸리티가 평가에 영향을 주어서는 안 된다. 일반적으로 환경과 유틸리티 조건은 장비 제조사가 사용자에게 요구하고, 사용자는 그 조건을 충족시켜야 한다. 정확한 평가를 위해 성능평가용 실험실은 장비 제조사가 요구하는 요구사항을 여유 있게 만족할 뿐만 아니라, 평가에 필요할 경우 그 이상의 조건도 제공할 수 있어야 한다. 아래 표는 한국표준과학연구원 SEM 성능평가 실험실의 측정환경이며, 국내외 열전자 SEM과 전계방출 SEM을 모두 평가할 수 있다. 제조사 현장에서 평가하는 경우, 장비에 따라 측정환경의 요구사항이 달라질 수 있으며, 제조사는 성능평가에 필요한 환경을 제공해야 한다.


	<b>주사전자현미경 성능평가 절차서</b>	절차서 등록번호	PE-SEM-001-
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정확인일	2022.12.9.

표 1. 성능평가 실험실의 환경 및 설비 요구사항 (한국표준과학연구원 SEM 성능평가실)

항목	요구사항
온도	(20 ± 3)℃
습도	<60 %
자기장, 교류, XYZ방향 모두	< 50 nT (0.5 mG)
바닥진동	< 4 μm/s @5 Hz
	< 10 μm/s @35 Hz
	< 14 μm/s @275 Hz
소음	< 52 dB @75 Hz
	< 43 dB @275 Hz
	< 47 dB @625 Hz
유틸리티	장비 제작사의 요구사항에 따름. 예로써, 주전원: (230 ± 23) V, 60 Hz, 단상 또는 2상, 전력 >3 kW 압축공기: (4-6) x 10 <sup>5</sup> Pa (4-6 bar) 질소기체: 압력 0.5 x 10 <sup>5</sup> Pa 기준 순도 99.999 % 이상 공급수: 온도 18~22 °C, 유량 35 l/h


#### 4-2. 시료의 보관 및 관리

시료는 가능한 한 성능평가실 안에 보관하며, 필요한 경우는 밀폐된 용기에 담아 이동한다. 시료가 오염되면 탄소오염이 심해지고, 영상에 오염물질이 많이 포함되어 영상의 품질이 떨어지고, 정확한 결과를 얻기 어렵다. 진공 또는 제습 데시케이터안에 보관할 것을 권장하며, 공기중에 방치하는 일이 없도록 한다. 180℃ 정도에서 굽기 또는 약한 플라즈마 클리닝은 시료를 정화하는 효과가 있다. 시료 오염이 너무 심하여 정화하기 어려울 경우에는 시료를 교체해야 한다.

배율교정용 시료와 분해능 평가용 시료 모두 다양하게 갖춰 놓는 것이 좋다. 평균피치를 재려면, 한 영상 안에서 같은 패턴이 충분한 개수만큼 반복되어야 하므로, 패턴 크기가 다양해야 여러 배율을 교정할 수 있다. 분해능 평가 시료도 여러 크기의 금입자를 쓸 수 있도록 다양하게 갖출 필요가 있다. 장비 분해능에 맞게, 입자가 너무 크거나 작은 시료를 쓰면 불리하다.

#### 4.3 SEM 작동 조건

필수 평가 항목이든지, 의뢰자가 별도로 요구하는 모든 평가는, 필요한 모든 가속전압과 배율에 대하여 수행되어야 한다. 만일 의뢰자가, 그들만의 별도의 목적으로 다른


	<b>주사전자현미경 성능평가 절차서</b>	절차서 등록번호	PE-SEM-001-
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정확인일	2022.12.9.

파라미터들 (드리프트, 빔 전류 등)을 요구되는 경우, 이들에 대한 평가가 수행된 후 결과는 보고서에 포함하여 기록되어야 한다.

배율, 가속 전압, 빔전류, 기타 파라미터를 장비제작사가 특정할 수 있겠지만, 모든 평가에서 초점, 비점보정, 콘트라스트, 그리고 밝기를 최적값으로 설정하는 것이 중요하다.

콘트라스트와 밝기가 제대로 조정된 영상만으로, 평가해야 한다. 콘트라스트와 밝기는 영상의 모든 화소의 회색도가 최저값이나 최고값을 갖지 않도록 조정되어야 한다. 잘못된 콘트라스트와 밝기 설정은 정보의 손실이 가져오고, 평가 오차의 원인이 될 수 있다. 비숙련자가 육안으로 보는 최적 영상과 실제는 다를 수 있다. 장비의 신호 세기 모니터나 영상 세기 히스토그램을 이용하여 신호가 잘리는 부분이 없도록 확인하는 것이 중요하다.

장비 이설시 정상적인 SEM 작동을 위해서, 시스템 조건의 복귀 후에도 안정화 시간이 필요할 것이다. 장비 제조사와 협의하고, 사용 가능한 상태가 확인된 후, 최소한 하루 이상 기다렸다 시작한다.

	<b>주사전자현미경 성능평가 절차서</b>	절차서 등록번호	PE-SEM-001-
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정확인일	2022.12.9.

## 5. 영상 배율 교정

### 5.1 교정 방법

#### 5.1.1 CRM을 장착한다.

시료실을 열고 CRM을 시료대에 장착한다. 사용하는 CRM은 상용 제품이든, 자체 제작품이든 모두 가능하다. CRM의 (1)직교 십자망 (2)선 배열, (3)점 배열, (4)직교 점 배열격자패턴의 형태중 어느 하나 또는 둘 이상일 수 있다. CRM은 다만, (1) 진공 및 반복되는 전자빔 노출에 대해 안정하고, (2) SEM 영상에서 콘트라스트가 좋 으며, (3) 전도성이 있고 (4) 기계적 손상이나 왜곡없이 정상적으로 쓰는 동안 발생 하는 오염을 제거하기 위해 세척이 가능해야 하고 (5) 관련 유효한 인증서가 있어야 한다. 인증서는 격자 피치의 인증값을 가져야 하며, 인증값은 명시된 불확도 내에서 미터표준에 소급성을 가져야 한다.<sup>6)</sup>

영상 내 최소한 5개 이상의 피치가 나올 수 있는 배율만 교정할 것을 권장한다. 다양한 배율을 교정하려면 여러 개의 CRM이 필요하다.

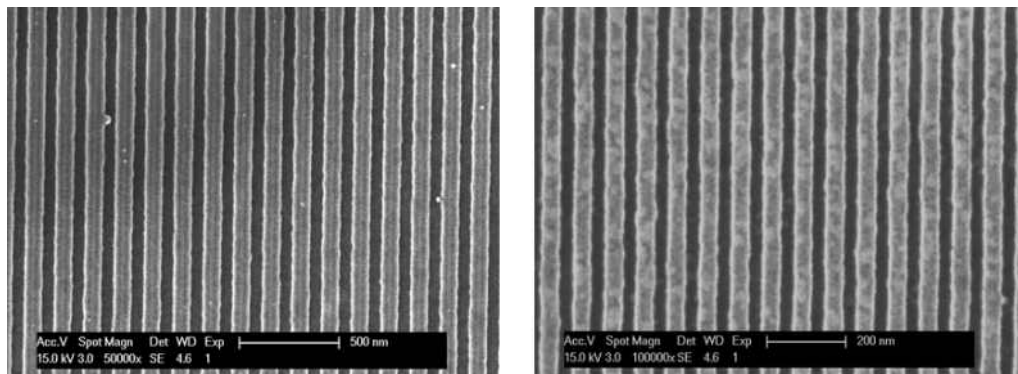


그림 3. KRISS CRM 207-01-002\_SN\_1D001-013 (피치 인증값: 왼쪽 150.0 nm  $\pm$  0.7 nm, 오른쪽 80.0 nm  $\pm$  0.3 nm, 단, 불확도는 k=2 인 확장불확도)

CRM은 방습 캐비넷이나 진공 보관함에 보관하는 것이 좋다. 시료가 오염되었을 경우, 교정에 영향을 줄 수 있으므로 오븐이나 플라즈마 클리너로 시료 표면을 청소해 준다. 오염이 심하면 폐기한다. 표면이 손상된 부분은 쓰지 않는다.

#### 5.1.2 SEM 작동조건을 설정한다.

##### 5.1.2.1 시료실을 닫고 진공 배기한다.

6) 측정표준기관에서 판매하는 CRM은 인용표준 ② 의 부록 A를 참조하라.

KRISs	주사전자현미경 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-SEM-001-
		제정일	2022
		최종 개정확인일	2022.12.9.

- 5.1.2.2 교정을 수행할 가속전압, 전자빔 전류 및 작업거리를 선택한다.
- 5.1.2.3 전자빔을 정렬하여 밝기를 최적화한다.
- 5.1.2.4 경사각을 0° 로 설정하여 CRM 표면과 전자빔에 수직이 되도록 한다.
- 5.1.2.5 image offset [beam offset]을 영으로 놓는다.
- 5.1.2.6 결상 모드를 선택한다 (이차전자 그리고 또는 후방산란전자).
- 5.1.2.7 영상 초점을 맞추고 비점 왜곡을 없앤다.
- 5.1.2.8 교정할 배율을 선택한다.<sup>7)</sup>
- 5.1.2.9 필요시, CRM을 기계적으로 돌려서 측정 패턴이 화면의 X 그리고/또는 Y 방향에 평행하도록 만든다.
- 5.1.2.10 설정한 작업 조건에서 장비가 충분히 안정화될 때까지 기다린다. 시료 영상의 드리프트가 없어질 때까지 기다린다.
- 5.1.2.11 CRM을 원하는 위치로 가져온다.
- 5.1.2.12 CRM 표면 위에 초점을 맞추고 대비contrast와 밝기brightness를 조정한다.

### 5.1.3 영상을 획득한다.

- 5.1.3.1 피치 패턴이 SEM의 XY 방향에 제대로 나란한지 확인한다.
- 5.1.3.2 사진주사photo scan 속도를 정한다.
- 5.1.3.3 영상을 획득한다.

### 5.1.4 기록 영상 내 거리를 측정한다.

- 5.1.4.1 에지 왜곡 효과를 최소화하기 위해, 화면 에지 근처에서의 측정을 피한다. 가급적 측정은 영상 영역의 중앙 80 %로 국한한다.
- 5.1.4.2 기록영상의 X 그리고/또는 Y 방향으로 피치를 측정한다. 이것은 위에 명시한 기록영상의 영역 안에서 두 표식 사이의 거리 - 피치의 정수배에 해당 - 로 측정할 수 있다.<sup>8)</sup>
- 5.1.4.3 측정 거리는 피치의 약 5~10배 또는 그 이상으로 한다.
- 5.1.4.4 이상의 기록영상을 이용한 측정을 최소 3 mm 이상 떨어진 곳에서 최소 3번 이상 반복한다.<sup>9)</sup>

### 5.1.5 측정된 거리로부터 화소크기 [척도막대 또는 영상너비]를 결정한다.

#### 5.1.5.1 화소크기

공식 (1)을 써서 화소 크기의 실제값,  $L_p$  을 결정한다:

7) 화면에 들어 오는 피치의 실제 개수로 5~10 정도를 권장한다.

8) 피치는 CRM의 반복 형상의 중심-대-중심, 에지-대-에지 사이의 거리로 측정할 수 있다.

9) 측정면적이 작은 격자의 경우, 주어진 유효면적내에서 충분히 떨어진 3곳 이상에서 실시한다.

KRISs	주사전자현미경 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-SEM-001-
			2022
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정확인일	2022.12.9.

$$L_p = \frac{d}{N_D} = \frac{d}{D/L_{p0}} = L_{p0} \times \frac{d}{D} \quad (1)$$

여기서,

$D$  는 교정 전 기록 영상에서 표시하는 평균 피치 (그림 4 참조).<sup>10)</sup> 교정전 소프트웨어로 잴 수 있다.

$N_D$  는  $D$  에 해당하는 화소수

$d$  는  $D$  에 해당하는 CRM 의 실제 피치 (인증값) (그림 5 참조)

$L_{p0}$  는 교정 전 화소 크기, 영상 정보 (메타 데이터)에 포함되어 있다.

$D$ 를 잰 후에  $d$ 와  $L_{p0}$  값을 대입한다.

X 및 Y 방향 모두에서 화소 크기를 계산하고 두 값이 일치하는지 확인한다.

#### 5.1.5.2 영상너비

공식 (2)를 써서 영상너비  $HFV$ 를 계산한다:

$$HFV = L_p \times L_H \quad (2)$$

여기서,

$L_p$  는 화소 크기의 실제값 (단위 : nm)

$N_H$  는 수평 방향의 영상 크기에 해당하는 화소수

#### 5.1.5.3 척도막대

공식 (3)를 써서 기록 영상에 나타난 척도막대의 표시값  $f_{\text{표시값}}$  (그림 4 참조)에 해당하는 실제 길이  $f_{\text{실제값}}$  을 계산한다:

$$f_{\text{실제값}} = N_{\text{척도막대}} \times L_p \quad (3)$$

여기서,

$L_p$  는 화소 크기의 실제값 (단위 : nm)

$N_{\text{척도막대}}$  은 기록 영상 내 척도막대의 길이에 해당하는 화소수<sup>11)</sup>

배율 오차가 없다면, 표시값  $f_{\text{표시값}}$ 와 실제값  $f_{\text{실제값}}$ 가 차이가 최소가 된다.

10) SEM 장비 자체 또는 별도의 외부 영상처리 소프트웨어를 써서 얻을 수 있다.

11) SEM 장비 자체 또는 별도의 외부 영상처리 소프트웨어를 써서 얻을 수 있다.



KRIS	주사전자현미경 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-SEM-001-
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정 확인일	2022.12.9.

#### 5.1.5.4 배율 M

배율과 화소크기는 반비례한다. 따라서 공식 (4)를 써서 실제 배율을 계산할 수 있다.

$$\frac{M_{\text{실제값}}}{M_{\text{표시값}}} = \frac{L_{p0}}{L_p} \quad (3)$$

여기서,

$M_{\text{실제값}}$  는 배율의 실제값 (단위 : nm)

$M_{\text{표시값}}$  는 배율의 표시값 (단위 : nm)

$L_p$  는 화소 크기의 실제값 (단위 : nm)

$L_{p0}$  는 화소 크기의 표시값 (단위 : nm)

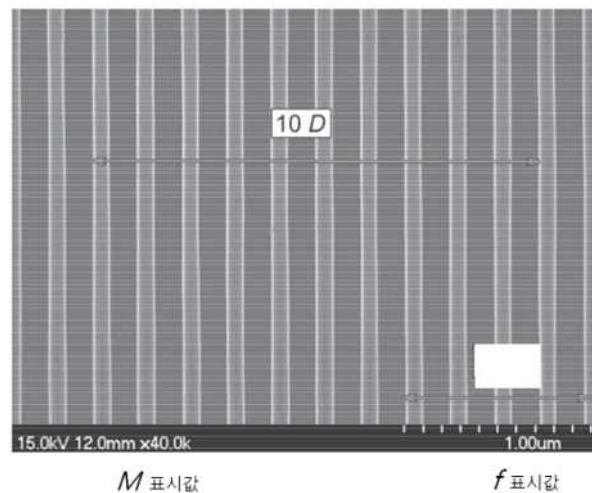


그림 4. 기록 영상 (출처: ISO 16700 Figure 3)

KRISs	주사전자현미경 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-SEM-001-
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정 확인일	2022.12.9.

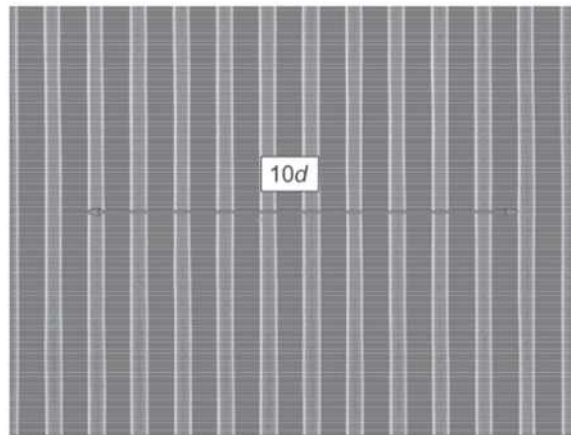


그림 5. 시료 (CRM) (출처: ISO 16700 Figure 4)

## 5.2 교정불확도 산정

참고문헌 ⑤ *측정불확도 표현 지침*을 참고하기 바란다. 본 절차서의 불확도 분석은 이 문헌의 산정 및 보고 방법을 따랐다.

(1)로부터

$$\frac{\Delta L_p}{L_p} = \frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta d}{d} \quad (5)$$

서로 독립적인 5 개의 불확도 요인을 고려할 수 있고, 식 (5)로부터 화소크기의 불확도 계산식을 구할 수 있다.

$$\frac{u_c(L_p)}{L_p} = \sqrt{\frac{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2}{D^2} + \frac{u_5^2}{d^2}} \approx \frac{\sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2}}{d} \quad (6)$$

### 5.2.1 A 형 불확도

피치를 9 군데서 재고 표준편차를 구하였다. 예로써, 15 kV, WD 5 mm, 배율 50 000의 조건에서  $D$ 의 평균값 81.35 nm와 표준편차 0.11 nm를 얻었다. 이 때 표준편차는 반복도 및 비균질도를 함께 반영한다. 뒤에 나오는 에지 결정 오차에 비해 비균질도는 충분히 작다고 판단되므로 여기서는 둘을 분리하지 않고, 하나의 오차로만 취급한다.<sup>12)</sup>

KRISs	주사전자현미경 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-SEM-001-
			2022
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정 확인일	2022.12.9.

$$u(x_1) = 0.11/\sqrt{(8)} = 0.039 \text{ nm}$$

## 5.2.2 B 형 불확도

### ② 측정 반복도에 따른 오차 $u(x_2)$

패턴의 에지 결정 시 개인차에 기인한 오차를 산정하기 위해, 동일한 영상에 대하여 다양한 방식으로 20번을 반복하여 피치를 측정하였다. 얻어진 표준편차 0.15 nm를 해당 표준불확도 성분으로 하였다.

$$u(x_2) = 0.15 \text{ nm}$$

### ③ 화소 크기에 따른 양자화 오차 $u(x_3)$

배율이 충분히 크면 이 오차는 무시할 수 있으나, 그렇지 않은 경우는 다음과 같이 고려해 준다.

$$u(x_3) = 0.29 L_p$$

$$L_p = \text{화소 크기}$$

$L_p = 2.233 \text{ nm}$ 인 경우,  $u(x_3) = 0.065 \text{ nm}$ 가 된다.

### ④ 온도변화에 따른 오차 $u(x_4)$

실험실 온도가  $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 로 유지되고 직사각형 분포를 할 경우, 온도변화에 따른 불확도  $u(x_4) = 1^\circ\text{C} / \sqrt{3} = 0.58^\circ\text{C}$ 로 놓을 수 있다. <sup>13)</sup>온도변화에 대한 피치변화의 감도계수는 아래와 같다.

$$c_4 = \alpha \times d$$

$\alpha$  : 표준시편의 열팽창계수

$d$  : 피치

12) 만일 비균질도를 무시할 수 없는 경우는 ANOVA 분석을 통해 비균질도에 따른 불확도 성분을 따로 구한다.

13) 시편 자체의 온도변화를 재야 정확하겠지만 현실적으로 이를 위한 작업이 복잡하고, 설사 그렇게 하더라도 그 효과가 미미하므로, 실험실 온도변화로 대신하였다.

KRISs	주사전자현미경 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-SEM-001- 2022
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정 확인일	2022.12.9.

로 주어진다. 시편의 재질이 실리콘일 경우 열팽창계수가  $2.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  이므로,  
 $c_4 = 0.0000026 / ^\circ\text{C} \times 80 \text{ nm} = 0.00021 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  로 계산된다.

⑤ 표준시편 피치의 인증값 불확도에 따른 오차  $u(x_5)$

우선 인증값에 의한 표준불확도  $u(x_5)$  는 인증서로부터 얻는다. 인증서의 불확도가  $k=2$  인 포함인자가 곱해진 확장불확도이면, 확장불확도를 2 로 나눈 값을 쓴다. 피치 인증값 80 nm 의 확장불확도가 0.3 nm 이므로,  $u(x_5) = 0.15 \text{ nm}$  이다.

### 8.3 합성 표준불확도 $u_c$

합성불확도는 산정된 각각의 불확도 성분과 해당 감도계수의 곱,  $u_i = c_i u(x_i)$ , 의 제곱합의 근으로 주어진다.

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2} = \sqrt{u(x_1)^2 + u(x_2)^2 + u(x_3)^2 + c_4^2 u(x_4)^2 + u(x_5)^2}$$

따라서 본 절차서 예의 경우,

$$u_c = \sqrt{0.039^2 + 0.15^2 + 0.65^2 + (0.00021 \times 0.58)^2 + 0.15^2} = 0.24 \text{ (nm)} \text{ 가 된다.}$$

### 5.2.3 확장불확도


원하는 신뢰수준을 갖는 구간을 추정하기 위한 포함인자  $k$  를 구하기 위하여,  $u_c$  의 유효자유도  $\nu_{eff}$  를 계산한다.

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum \frac{u_i^4}{\nu_i}} = \frac{0.24^4}{\frac{0.039^4}{7} + \frac{0.15^4}{19} + \frac{0.65^4}{\infty} + \frac{0.0004^4}{\infty} + \frac{0.15^4}{\infty}} \approx 122$$

확장불확도는

$$U = k u_c$$

의 형태로 준다.  $\nu_{eff} = 122$  이므로, t-분포표로부터  $k=2$  는 대략 신뢰수준 95 %의

	<b>주사전자현미경 성능평가 절차서</b>	절차서 등록번호	PE-SEM-001-
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정확인일	2022.12.9.

신뢰구간을 추정한다. 본 절차서 예의 경우,  $U = 0.48 \text{ nm}$  이다.

아래 표는 이상의 불확도 산정내용을 정리한 불확도 총괄표이다.

표 1. 50 000 배 영상의 80 nm 피치 측정 불확도 총괄표

표준불확도 성분, $u(x_i)$	불확도의 원인	표준불확도 값	감도계수	합성표준불확도 예의 기여, $u_i =  c_i  u(x_i)$	자유도
시편 균질도, $u(x_4)$	시편의 위치에 따른 피치 변화	0.039 nm	1	0.039 nm	7
측정 반복도, $u(x_1)$	개인오차나 LER에 기인한 재현성 오차	0.15 nm	1	0.15 nm	19
화소 크기, $u(x_2)$	화소크기에 따른 양자화 오차	0.064 nm	1	0.064 nm	$\infty$
온도변화, $u(x_3)$	실험실의 온도변화	0.58 °C	0.0021	0.00 nm	$\infty$
인증값 불확도, $u(x_5)$	표준시편 인증서에 인용된 오차	0.15 nm	1	0.15 nm	$\infty$
$u_c^2 = \sum u_i^2 = 0.24 \text{ nm}^2$ $2u_c = 0.48 \text{ nm}$ $\nu_{eff} = 122$					

표 1의 결과 및 식 (6)으로부터 화소 크기(표시값: 2.233 nm)의 실제값의 평균과 확장불확도( $k=2$ )를 계산할 수 있다.

식(1)로부터 화소크기의 평가값은  $L_p = 2.233 \text{ nm} \times \frac{80.0}{81.4} = 2.195 \text{ nm}$ , 확장불확도는  $0.48 \text{ nm}/10 = 0.048 \text{ nm}$ , 유효자유도는  $\nu_{eff} = 122$  로 동일하며 다음과 같다.

$$L_p = 2.195 \pm 0.048 \text{ nm} \text{ (신뢰수준 약 95 \%, } k = 2)$$

### 5.3 평가결과서 작성방법

KRISs	주사전자현미경 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-SEM-001-
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정확인일	2022.12.9.

평가결과서에 일반적으로 포함해야 할 사항은 다음과 같다.

- (1) 평가기관명 및 의뢰기관명
- (2) 평가번호
- (3) 평가일자
- (4) 평가환경: 영상 획득 당시 SEM 주변 온도 및 습도
- (5) 사용한 SEM의 제작사, 모델 및 일련번호
- (6) 사용한 표준시료의 제작사, 모델 및 일련번호
- (7) SEM 영상 획득 조건
- (8) SEM 영상의 파일명, 크기, 화소수 및 평가전 화소크기
- (9) 평가에 사용한 시험절차서명 또는 방법
- (10) 평가에 사용한 영상 및 데이터 처리 소프트웨어
- (11) 평가결과
- (12) 기타 의견 및 참고사항

KRISs	주사전자현미경 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-SEM-001-
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정확인일	2022.12.9.

## 6. 분해능[선명도] 평가

### 6.1. 평가 방법

#### 6.1.1. 시료

분해능[선명도] 시험 시료는 탄소기판 위에 증착된 금입자를 쓴다. ISO TS 24597의 부록 G에는 시료제작에 관한 두 가지 기본 기술을 수록하고 있다. 첫 번째 방법은 연마된 탄소 기판이나 HOPG를 이온빔 조사나 플라즈마 에칭으로 표면을 처리한 후 진공증착으로 금입자를 올린다. 기판을 표면처리하면 부착된 금 입자들의 분포가 균일해진다. 두 번째 방법은 재래식 스퍼터 코터를 써서 HOPG 기판에 평균 두께가 약 1 nm인 박막을 증착한다. 금 입자의 알갱이 크기는 스퍼터링 시간을 변화시킴으로써 쉽게 조절할 수 있다. SEM 관찰 전에 시료를 진공에서 약 180 °C에서 구워주면 전자빔-유발 탄소오염을 줄이는 데 효과적이다.<sup>14)</sup> 그림 6과 그림 7은 각각 두 방법으로 제작된 시료의 SEM 영상이다.

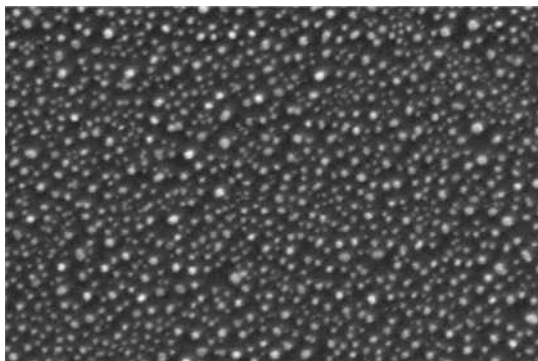


그림 6. 진공증착을 써서 HOPG 기판위에 증착한 금 입자의 SEM 영상  
(증착전 기판을 플라즈마 에칭 처리)(출처: ISO/TS24597 Figure G.1)



그림 7. HOPG 기판위에 증착한 나노미터-수준의 금 입자의 SEM 영상  
(금 입자는 스퍼터 코터로 증착)(출처: ISO/TS24597 Figure G.2)

**노트:** 전자의 조사량에 예민한 물질은 영상 분해능[선명도] 평가를 위한 시료로 쓰기에 적합하지 않다. 전자빔-유발 손상이나 오염으로 물질의 에지가 변할 수 있기

14) 굳이 직접 시료를 제작할 필요가 없다. SEM 부속품 판매회사들에서 분해능[선명도] 시험 시편을 쉽고 다양하게 구입할 수 있다. 이들 사용 시료들은 모델번호가 있어서 분해능[선명도] 계산결과 발표시 인용하기도 편하다.

KRISs	주사전자현미경 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-SEM-001-
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정확인일	2022.12.9.

때문이다. 또한 시료는 깨끗해야 한다. 그렇지 않으면 장비의 최고 분해능[선명도]을 쥔 수 없다.

### 6.1.2 장비<sup>15)</sup>

본 시험은 표준 시료의 일부 영역을 적절히 선택하여 촬영된 SEM 영상으로부터 출발한다. 분석 영상은 최소한 다음의 요구들을 만족해야 한다. 만족하지 못하는 영상은 잘못된 결과를 생산할 수 있으므로, 기각해야 한다.

#### 6.1.2.1 SEM

사용한 SEM 장비는 정상 상태이어야 하고, 요구되는 성능검사가 완료된 것이어야 한다.<sup>16)</sup> 또한 촬영 조건들이 잘 맞아 있어야 한다. 시료 자체, 영상의 전경과 배경, 밝기와 대비, 대비-대-잡음비 (CNR) 등은 영상 분해능[선명도]에 영향을 준다. 그러므로 분해능[선명도] 평가를 위하여 최소한 다음 인자들을 고려하여 영상을 획득하는 일이 필요하다. 특히 밝기, 대비 그리고 대비-대-잡음비를 최적화하는 전자 프로브 전류 및 초점을 찾아야 한다.

#### 6.1.2.2 시료 경사각

시료 경사각을 0° (경사 없음)로 한다.

#### 6.1.2.3 시야각 (field of view)

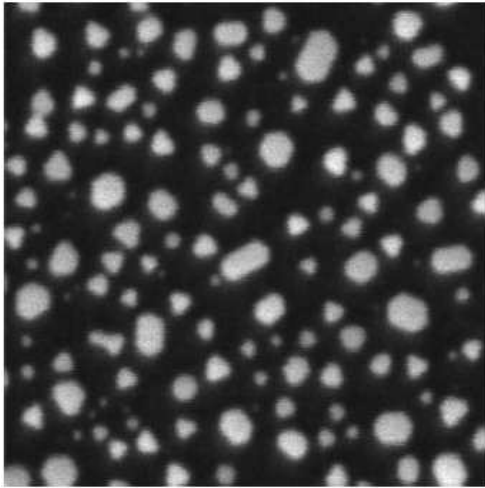
영상 분해능[선명도]는 표면의 편평한 정도에 따라 변하므로, 시야각은 편평하고 매끈한 표면을 포함하도록 잡는다. 그림 8 a)와 b)는 각각 허용되고 허용되지 않는 시야각을 보여준다. 수십 화소 크기의 입자들을 선택한다.

15) 본 절의 내용은 ISO/TS 24597에 기반하여 작성되었다. 물론 이 내용만으로 평가에 쓰이는 영상 데이터의 유효성이 100 % 보장된다고 볼 수는 없다. 같은 영상안이라고 해도 입자의 콘트라스트가 다르든지, 두 입자가 인접해 있는 경우 분해능[선명도]이 다르게 계산될 수 있다. ISO TC202/SC4의 한 study group에서는 현재의 미분법을 보완하기 위한 연구를 수행중이다. 참고로 본 절차에 사용된 평가앱이 출력하는 개별적인 에지 세기 곡선들은 데이터의 유효성의 검증 및 향상에 활용될 수 있다.

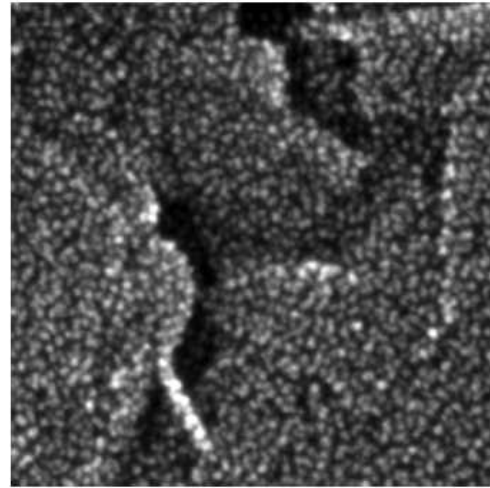
16) 배율교정을 포함하여 제작사 또는 인증기관이 제공하는 성능검사가 완료된 장비. 문서 ISO/TS 21383 *Qualification of the SEM for quantitative measurements* (인용표준 ①)참조.



KRISs	주사전자현미경 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-SEM-001-
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정 확인일	2022.12.9.



a) 허용되는 영상



b) 허용되지 않는 영상

그림 8 - a)허용되는 b)허용되지 않는, 전경(foreground) 영상을 가진 SEM 영상 (출처: ISO/TS24597 Figure 1)

#### 6.1.2.4 화소크기

화소크기가 예상되는 영상 분해능[선명도]의 **2~3 배**가 되도록 배율을 설정한다.<sup>17)</sup> 화소크기는 몇 가지 방식으로 제공된다. 화소크기 값으로 직접 주어지기도 하고, 수평시야폭과 화소수 또는 내부 막대자의 표시값과 막대자에 포함된 화소수로 주어지기도 한다. 영상 선명도를 평가하기 위해 앞서, ISO 16700에 따라 수평시야폭(horizontal field width)과 내부막대자(scale bar)가 교정되어 있음을 전제로 한다.

영상 분해능[선명도]는 우선 화소수 ( $R_{PX}$ )로 계산된다. 그 다음, 화소크기를 써서 나노미터로 환산한다 ( $R_L$ ):

$$R_L = L_p \times R_{PX}$$

#### 6.1.2.5 영상의 밝기와 대비

영상의 신호세기는 넓게 분포되어야 한다. 그림 9 a), b), c) 그리고 d)는 각각 허용

17) ISO 24597에서는 화소크기를 영상 분해능[선명도]의 40 % (=1/2.5) 정도를 권장한다. 한편 부록의 유효성 평가결과를 보면 (10 ~ 100) % 범위에서도 사용가능하다.

KRISs	주사전자현미경 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-SEM-001-
		제정일	2022
		최종 개정 확인일	2022.12.9.

되거나 허용되지 않는 영상의 예를 보여준다. 각 영상내부에 같은 높이의 점선에 해당하는 단면 곡선을 영상 아래에 추가하였다.

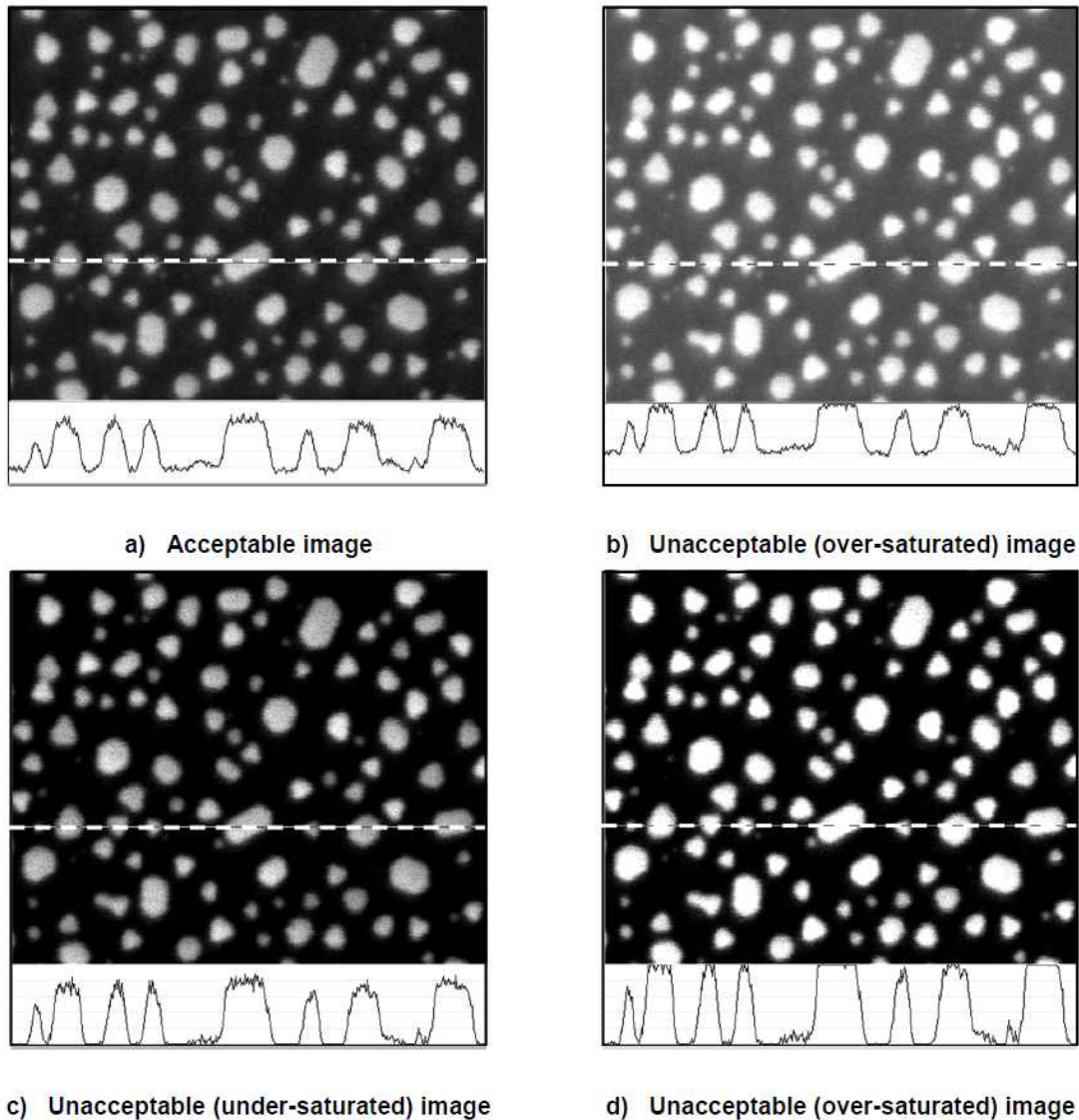


그림 9 허용가능하거나 허용가능하지 않은 밝기 및 대비를 가진 SEM 영상들. (출처: ISO/TS24597 Figure 2)

#### 6.1.2.6 영상의 대비-대-잡음비

KRIS	주사전자현미경 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-SEM-001-
		제정일	2022
		최종 개정확인일	2022.12.9.

영상의 대비-대-잡음비 (CNR)은 10 이상이어야 한다. 여기서, CNR은 영상 대비  $C_{\text{image}}$ , 가장 밝은 영역과 어두운 영역의 평균세기 차이, 와 영상 잡음의 표준편차  $\sigma_n$  과의 비(比)다 (그림 10).

$$CNR = C_{\text{image}} / \sigma_n$$

그림 11은 CNR 이 각각 5, 10, 50 인 모사 영상(simulated image)이다.

그림 12는 CNR이 약 4 와 30 인 SEM 영상의 예이다.

**노트:** 좋은 CNR의 SEM 영상을 얻으려면, 프로브 전류 그리고/또는 영상 획득시간을 조정해야 한다. 위 변수들의 변화가 영상 분해능[선명도] 평가에 영향을 준다는 사실을 주지해야 한다.

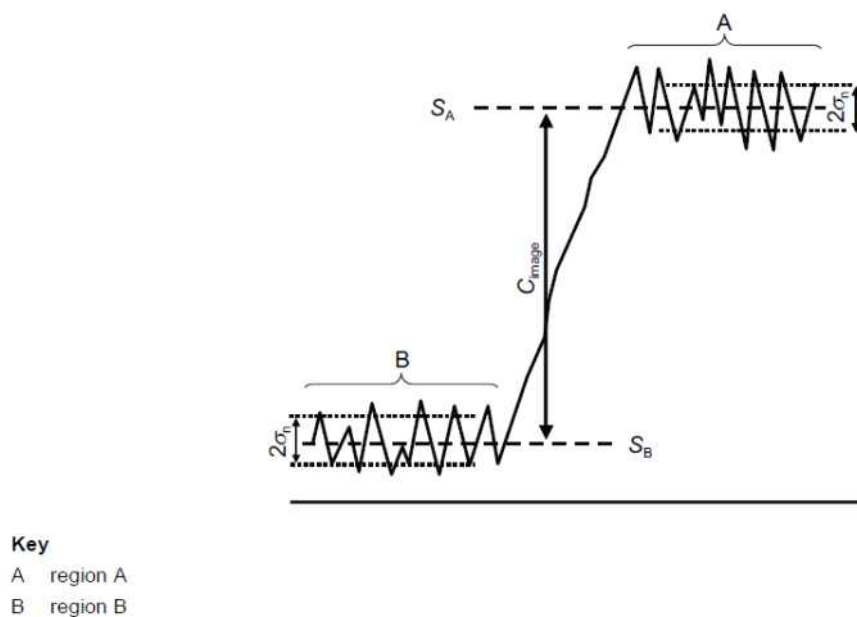


그림 10. 영상의 밝기곡선 (출처: ISO/TS24597 Figure 3)

KRISS	주사전자현미경 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-SEM-001-2022
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정확인일	2022.12.9.

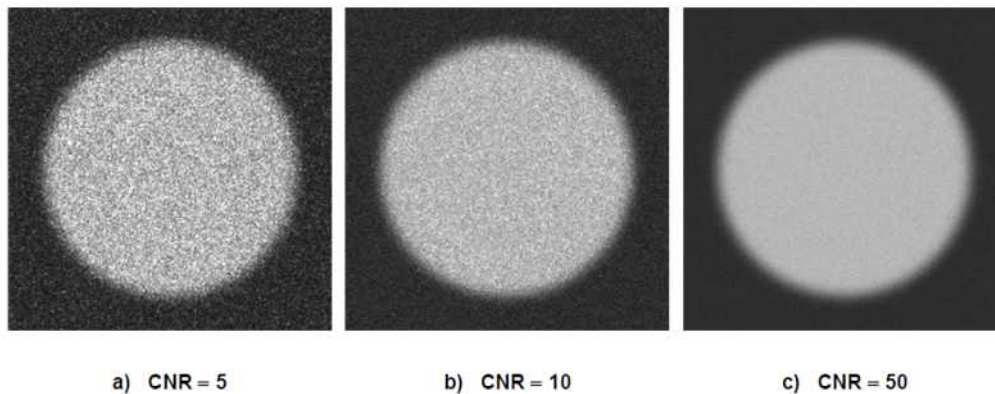


그림 11. 대비-대-잡음비가 다른 모사 영상들 (출처: ISO/TS24597 Figure 4)

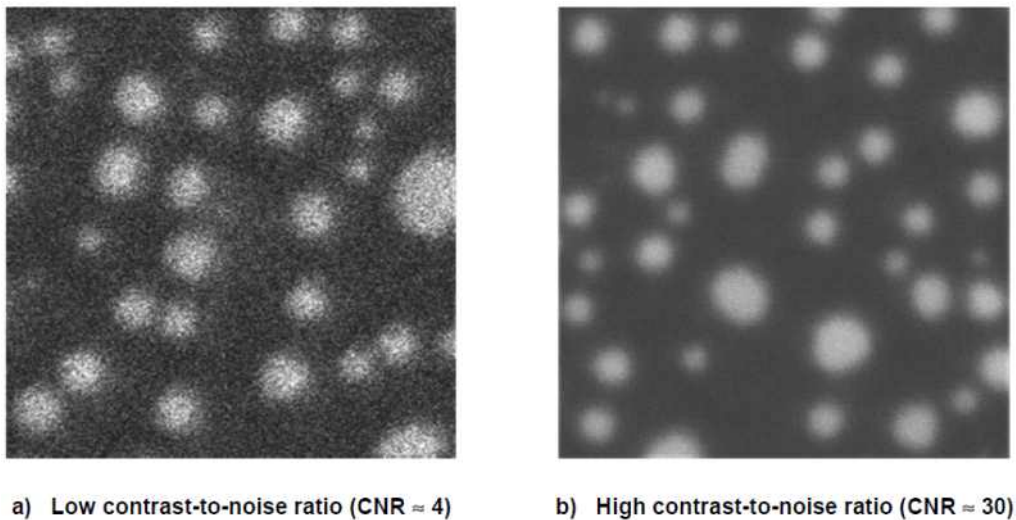


그림 12. 대비-대-잡음비가 다른 두 SEM 영상(출처: ISO/TS24597 Figure 5)

#### 6.1.2.7 영상의 초점과 비점

전자빔의 초점을 가능한 잘 맞춘다. 비점수차도 최소화한다. 탈초점과 비점은 영상 분해능[선명도]에 직접적인 영향을 준다.

#### 6.1.2.8 외부 요인들에 의한 간섭

기계 진동, 자기장 왜곡 및 ISO 16700:2004 부록 B<sup>18)</sup>에 나와 있는 외부 요인은 영

18) SEM 배율에 영향을 주는 요인들. 전자총 전압의 불안정, 콘덴서 렌즈의 세기 조합, 최종렌즈의 비점, 렌즈의 자기이력, 긴 초점심도 특히 저 수렴각에서의 부정확한 초점, XY주사의 비직

KRISs	주사전자현미경 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-SEM-001- 2022
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정확인일	2022.12.9.

상 분해능[선명도]에 영향을 미친다. 이 요인들에 의한 영향을 최소화한다.

#### 6.1.2.9 거짓 대비 (Erroneous contrast)

영상이 거짓 대비 (예: 시료 대전에 의한 대비)를 포함하지 않도록 한다.

#### 6.1.2.10 SEM 영상 데이터 파일

SEM에서 직접 저장된 영상 데이터는 회색도가 적어도 8 비트인 디지털 포맷이어야 한다. 영상 데이터 파일은 비압축 그림 파일 포맷, 즉, 비압축 BMP 또는 비압축 TIF 이어야 한다.

#### 6.1.2.11. SEM 영상획득 및 영상 내부 영역 선택

이 절에서 기술된 절차는 본 절차서의 모든 절차에 공통이다.

- a) 6.1.1 절에 나와 있는 요구사항을 만족하는 시료를 사용하여, 영상을 획득한다.
- b) 최소한 256 x 256 화소로 이루어진 SEM 영상 (이후 영상이라고만 함) 안에서 정사각형 영역을 선택한다. 영역은 오차 유발 데이터 (예: 배울 표시, 척도 막대, 문자, 화살표 등)가 덧붙여지지 않도록 한다.

선택 영역은 겹치지 않은 입자상을 포함하는 것이 좋다.

- c) 영상을 6.1.10 절에 명시된 비압축 그림파일 포맷의 데이터 파일로 저장한다.

### 6.1.3 영상 분해능[선명도] 계산

SEM 영상의 분해능[선명도]는 실행파일(향후 편의상 <WISE.exe>라 부른다)을 써서 계산한다. <WISE.exe>의 ISO TC 24597의 미분법 알고리즘에 따라 제작되었다. 아래는 해당 알고리즘에 대한 간결한 요약이다.<sup>19)</sup>

교, 주사발생회로의 비선형 특성, 주사회전의 비선형성, 외부의 전기장 및 자기장, 배울 오차, 시료표면 경사, 불완전한 경사 보정, 미분이나 동형 처리 같은 신호처리의 부작용, 전자회로의 열 효과, 기록용 CRT와 모니터용 CRT의 배율차, 카메라 렌즈의 왜곡 및 사진 영상 대 CRT 영상의 비, 사진의 물질변화 및 조절작업, 디지털 기록장치의 부정확도 또는 왜곡 등이 있음. 이들은 배울오차뿐만 아니라 분해능[선명도]에도 영향을 준다.

19) 출처: ISO/TS 24597 (인용표준 ③) 6.5 절

KRISs	주사전자현미경 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-SEM-001- 2022
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정확인일	2022.12.9.

미분법은 에지 밝기곡선의 추출 및 오차함수에의 맞춤에 기반하고 있다. 이 방법은 에지의 분해능[선명도]가 레일레이-아베 기준에 의해 정의되는 변수와 관련된다는 사실을 토대로 한다. 그러므로 미분법으로 에지의 분해능[선명도]를 결정할 수 있다. 에지 밝기곡선은 오차함수로 모델링한다. 만일 점퍼짐 함수가 가우스 곡선이라 가정하면, SEM 영상속의 에지 밝기곡선은 오차함수로 근사할 수 있다. 오차함수를 영상속의 추출된 모든 에지들에 맞춤한다 (그림 13 참조). 그 평균으로부터, 분해능[선명도] 인자 - 정의에 의하여 영상 분해능[선명도]와 관련됨 - 를 유도한다.

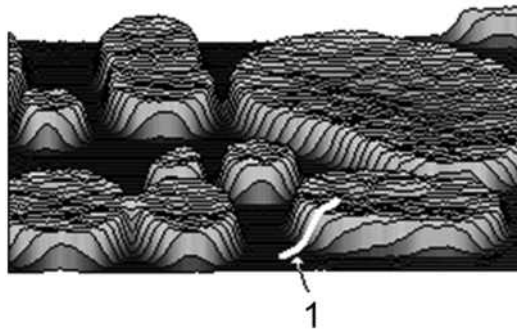


그림 13 - 미분(DR)법의 기본 개념 (출처: ISO/TS24597 Figure 13)

그림 14 는 아래에 기술된 a)부터 d)까지의 계산 서브루틴으로 이루어진 미분법의 간단한 흐름도이다.



KRISs	주사전자현미경 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-SEM-001-
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정 확인일	2022.12.9.

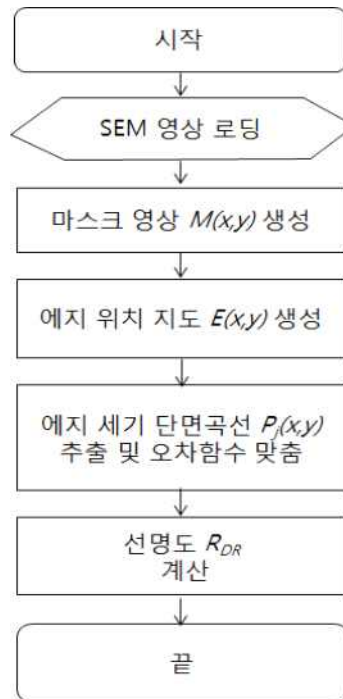


그림 14. 미분법의 간단한  
흐름도 (출처: ISO/TS24597  
Figure 14)

a) 이진 마스크 영상  $M(x,y)$  생성

1) 원본 영상을 일차미분 가우스 곡선 (표준편차  $s=2$  화소)으로 합성곱하여 구배 절대값  $G_M(x,y)$ 를 계산한다.

2)  $G_M(x,y)$ 로부터, 두-평균 문턱에 기반하여, 이진 영상  $B(x,y)$ 를 계산한다.

3)  $B(x,y)$ 를 닫기 연산 (one-iteration binary-closing operation)으로 다듬어

이진 마스크 영상  $M(x,y)$ 를 계산한다. 다음, 영상 테두리에 가까운 모든 물체 화소들을 영으로 놓고, 또한 영상 내부에 화소를 거의 포함하지 않은 물체들을 모두 없앤다.

b) 에지점 위치 지도  $E(x,y)$ 의 생성

KRISs	주사전자현미경 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-SEM-001-
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정확인일	2022.12.9.

1) 원본 영상을 1 차 및 2 차 미분 가우스 곡선 (표준편차  $\sigma$ )으로 합성곱하여 에지 위치 영상  $P_L(x,y)$ 를 계산한다.

2)  $M(x,y)$ 내 두-평균 문턱처리하여,  $[P_L(x,y) - |P_L(x,y)|]$ 의 최대값으로부터 이진 마스크  $M_1(x,y)$ 를 계산한다.

3)  $M_1(x,y)$ 에 닫기 연산을 수행한 결과로부터 골격화 (skeletonization)를 통해 초기 이진 에지점 밝기 영상  $E_1(x,y)$ 를 계산한다.

4)  $E_1(x,y)$ 로부터 윤곽선을 따라 최소 10 화소 거리만큼 서로 떨어진 위치만을 고려하여 에지점 위치 밝기  $E(x,y)$ 를 계산한다.

c) 에지 밝기 곡선  $P_j(x,y)$ 의 추출 및 오차함수 맞춤

1)  $G_M(x,y)$ 의 규격화에 기반하여,  $E(x,y)$ 의 모든 위치에 대하여 규격화된 구배  $G_N(x,y)$ 를 계산한다.

2)  $E(x,y)$ 로 주어진 초기 에지 위치로부터  $G_N(x,y)$ 의 양방향을 따라 반 화소 간격의 총 41 개 위치에서 서브-화소 곡선 위치  $P_{Si}(x,y)$ 를 계산한다.

3) 곡선 위치에서의 원본 영상으로부터 3차 보간(cubic interpolation) 을 써서  $P_{Si}(x,y)$ 에서의 서브-화소 밝기값  $P_j(x,y)$ 를 찾아온다.

4) 오차함수를  $P_j(x,y)$ 에 맞춤하여, 에지 분해능[선명도]  $s_j$ 를 계산하고 저장한다.

d) 영상 분해능[선명도]  $R_{DR}$ 의 계산

1) 모든 에지 경사에서 결정된 에지 분해능[선명도]의 평균으로 전체 에지 분해능[선명도]  $\sigma$ 를 계산한다.

2) 영상 분해능[선명도]  $R_{DR}$  을  $R_{DR} = \sqrt{2} \sigma$  로부터 계산한다.



<b>KRISS</b>	<b>주사전자현미경 성능평가 절차서</b>	절차서 등록번호	<b>PE-SEM-001-</b> <b>2022</b>
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정확인일	2022.12.9.

그림 15는 실행파일 <WISE.exe>을 써서 분해능[선명도]를 계산한 실제 예이다.<sup>20)</sup>

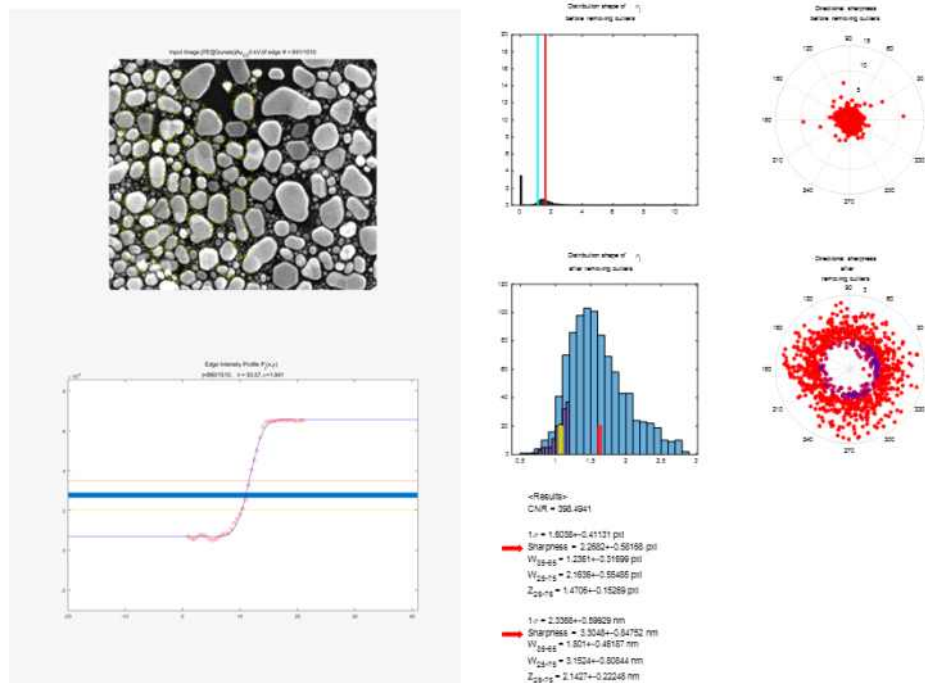


그림 15. WISE.exe 에 의한 분해능[선명도] 계산 결과 예.

#### 6.1.4 평가 기록의 결과

데이터는 방대할 뿐 아니라, 필요성이 없는 경우가 대부분이어서 별도로 기록하지 않는다. 필요하다면 파일 형태로 출력할 수 있다.

결과 산출을 위한 계산식은 복잡하고 방대하므로 이 역시 별도로 기록하지 않으며, 대신 ISO 24597 (인용표준 ③)을 참조한다.

불확도는 산정하지 않는다. 일반적으로 분해능[선명도]이 수 nm 범위임을 고려하여 편의 상 소숫점 둘 째 자리까지 처리한다.

## 6.2 분해능[선명도] 계산 알고리즘의 유효성 검증

20) 실행파일 <WISE.exe>은 ISO/TS 24597에 수록된 미분법 알고리즘에 따라 한국표준과학연구원 에서 제작되었다. 인터넷 웹페이지에 업로드할 예정이다 (웹 주소: <https://reid.kbsi.re.kr/web/lay1/bbs/S1T297C313/A/3/list.do>).

KRIS	주사전자현미경 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-SEM-001-
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정확인일	2022.12.9.

그림 16은 분해능[선명도] 계산 프로그램을 검증하기 위한 원(圓), 단차 및 곡물입자 모양의 기준 영상 모음이다. 프로그램을 써서 인위적으로 테두리가 이상적인 회색조 곡선(오차함수 곡선)을 가지는 원 영상을 생성하였다. 영상생성 시 입력 변수인  $\sigma$  값(명목값)이 분해능[선명도] 계산 프로그램의 수행 결과인 계산값과 같은지 확인하였다.

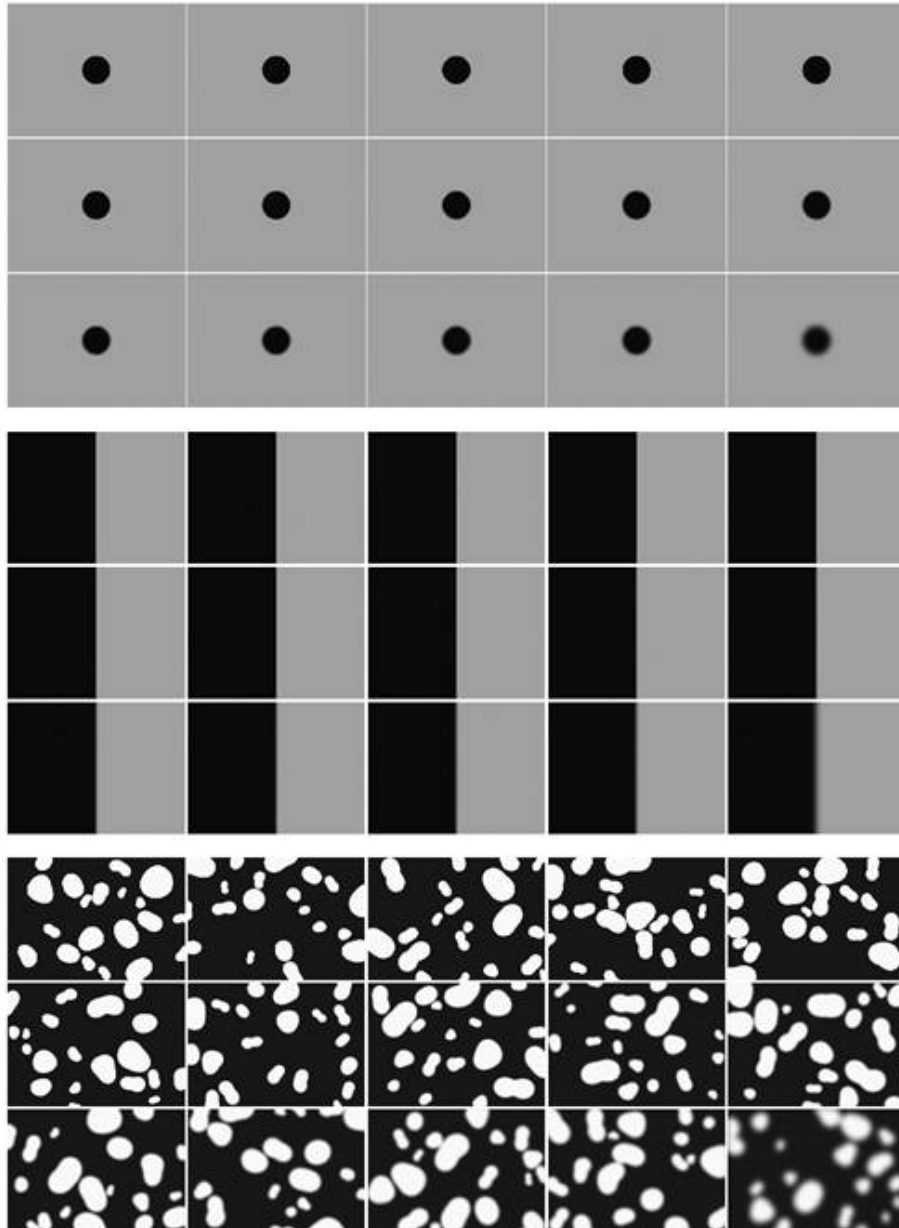


그림 16. 원(上), 단차(中) 그리고 곡물(下) 모양의 모사된 기준영상 모음. 각 모양마다 분해능[선명도]가 다른 15 개의 영상을 준비. 분해능[선명도]는 오른쪽으로 갈수록, 아래로 갈수록 떨어짐 (윗줄:  $\sigma=0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1$ ; 가운데 줄:  $\sigma=2, 3, 4, 5, 6$ ; 아랫줄:  $\sigma=7, 8, 9, 10, 20$ , 단위: 화소).

KRIS	주사전자현미경 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-SEM-001-
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정확인일	2022.12.9.

그림 17은 프로그램 WISE에 의한 분해능[선명도] 계산 결과의 예이다.

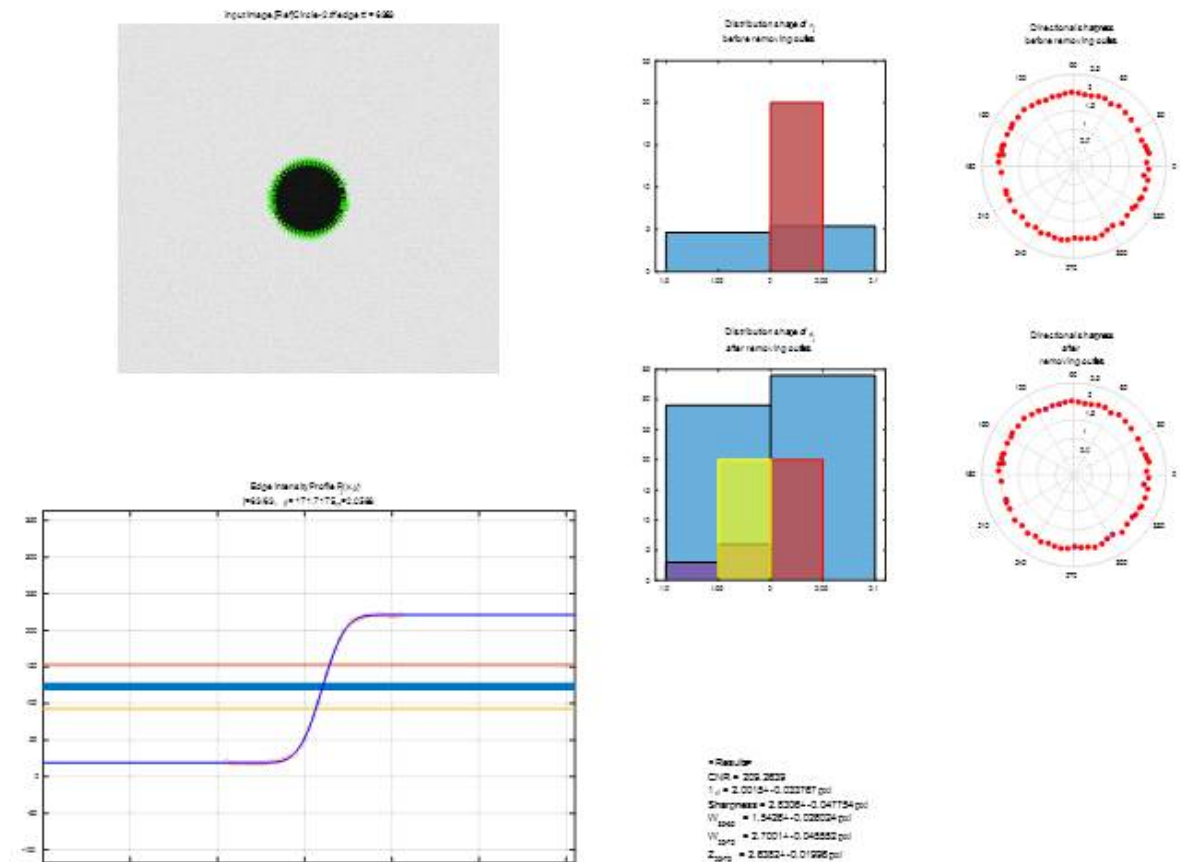


그림 17. 기준 영상의 분해능[선명도] 계산 결과 예 ( $\sigma = 2.0$ , 분해능[선명도] 계산값  $\sigma_{PX} = 2.002$ ).

화소크기와 분해능[선명도]값의 차이가 크면, 계산값의 오차가 커진다. WISE의 유효범위를 알아보기 위해  $\sigma$ 의 입력값 (명목값)과 계산값과의 차이를 알아보았다 (그림 18 참조). 이상적으로는 계산값과 명목값이 같아야 하지만, 실제로는 기준영상의 모사오차, 여러 단계의 영상처리 및 맞춤영역의 차이 때문에 계산오차가 발생한다. 맞춤된 에지선의 개수만큼 개별적인  $\sigma$ 값들이 산출되며, 검은 원과 오차막대는 각각 이 산출값들의 평균 및 표준편차를 나타낸다. 화소크기가 분해능[선명도](또는  $\sigma$ )에 비해 너무 작으면 계산값이 명목값보다 커지고, 너무 크면 명목값보다 작아진다. 화소크기가 분해능[선명도]의 1 ~ 1/10 범위 (두 점정 세로 점선)안에 있다면,  $\sigma$ 값의 평균이 명목값에서 크게 벗어나지 않음을 알 수 있다 (2 % 이하). 통상적으로  $\sigma=2\sim5$ 의 영역을 쓴다면, 계산 오차는 무시할 수 있다.

KRIS	주사전자현미경 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-SEM-001-2022
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정 확인일	2022.12.9.

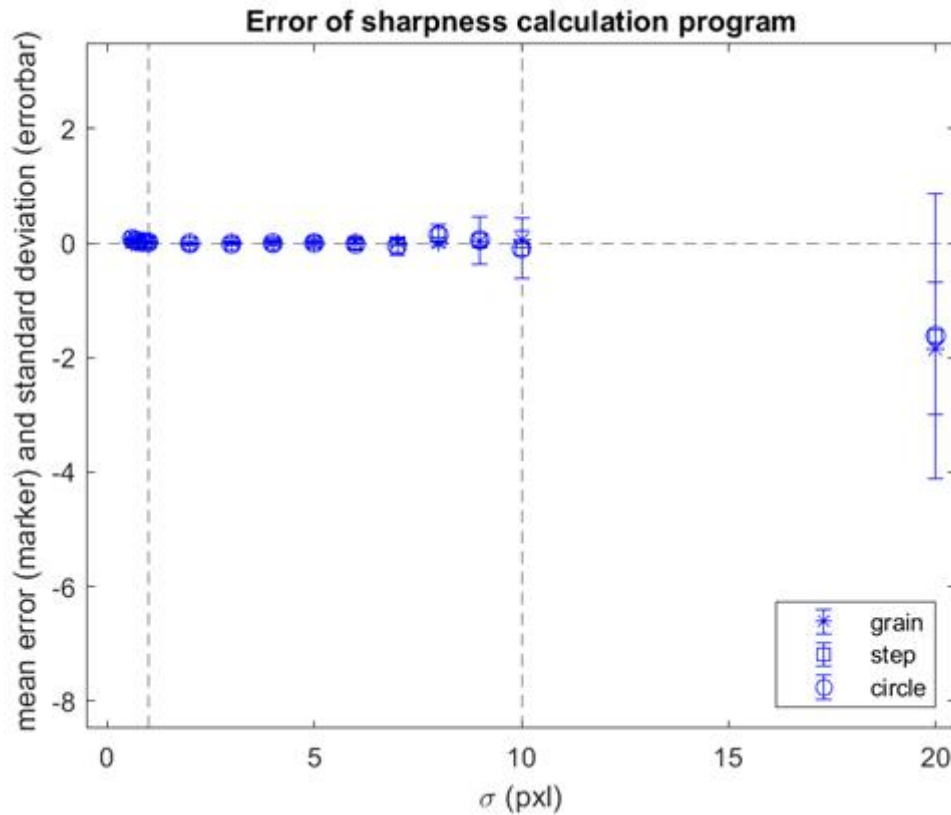


그림 18. 여러  $\sigma$  에 대하여, 모사 기준영상 대 WISE로 구한 계산값

그림 19는 계산된 분해능[선명도]의 평균 및 표준편차의 상대오차를 다르게 표시한 것이다. 파란선에서 알 수 있듯이  $\sigma$ 가 화소크기의 1~10 배까지의 범위에 있으면 (두 검정 세로선), 프로그램에 의한 분해능[선명도] 계산오차가 2 % 이내임을 알 수 있다.

<b>KRISS</b> 주사전자현미경 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-SEM-001-2022
	제정일	2022.12.9.
	최종 개정확인일	2022.12.9.

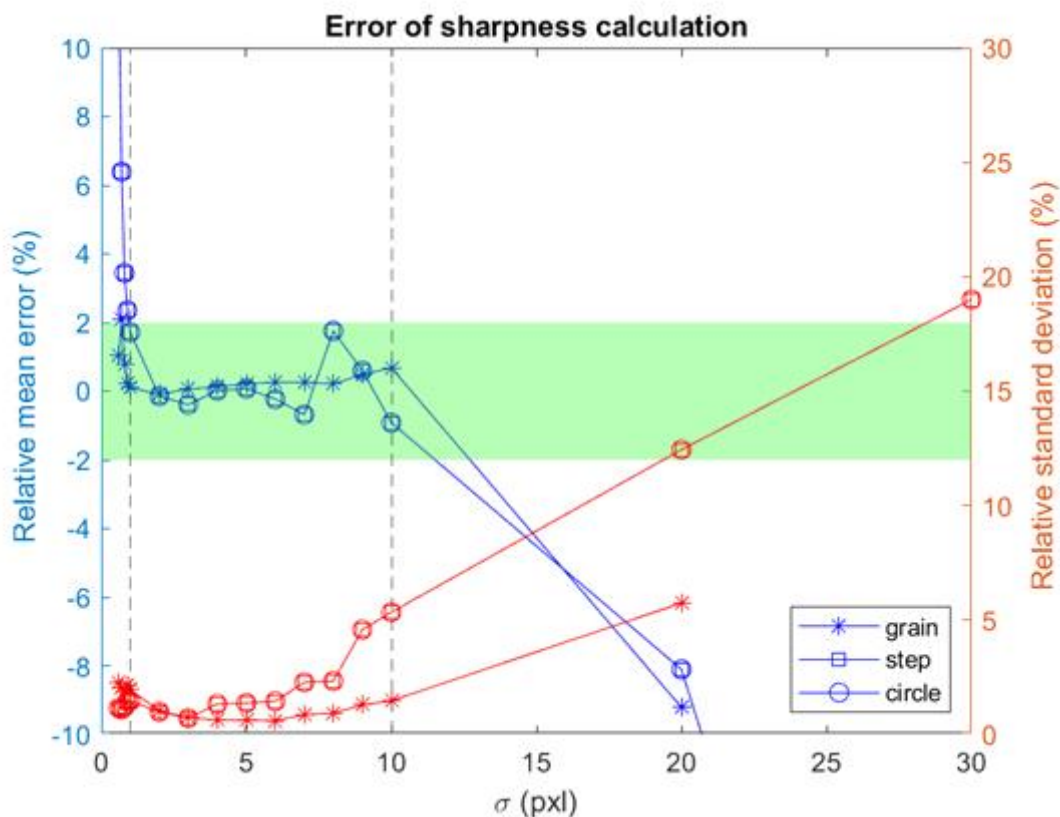


그림 19. 여러  $\sigma$ (명목값)에 대한,  $\sigma$ (계산값)의 평균(파란색) 및 표준편차(빨간색)의 상대오차. 두 수직선은 각각  $\sigma$ 가 1과 10인 영역을, 연두색 그림자는 -2%와 2% 사이의 상대오차 영역을 표시한다.

### 6.3 성능평가결과서 작성방법

성능평가결과서에 일반적으로 포함해야 할 사항은 다음과 같다.

- (1) 평가기관명 및 의뢰기관명
- (2) 평가번호
- (3) 평가일자
- (4) 평가환경: 영상 획득 당시 SEM 주변 온도 및 습도
- (5) 사용한 SEM의 제작사, 모델 및 일련번호
- (6) 사용한 표준시료의 제작사, 모델 및 일련번호
- (7) SEM 영상 획득 조건
- (8) 사용한 SEM의 소급성 (화소크기 소급성 포함)
- (9) SEM 영상의 파일명, 크기, 화소수 및 화소크기

<b>KRISS</b>	<b>주사전자현미경 성능평가 절차서</b>	절차서 등록번호	PE-SEM-001-
			<b>2022</b>
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정확인일	2022.12.9.

- (10) 평가에 사용한 성능평가절차서명 또는 방법
- (11) 평가에 사용한 분해능[선명도] 계산 소프트웨어
- (12) 평가결과
- (13) 기타 의견 및 참고사항


## 7. 기타

**[별첨 1] 주사전자현미경 성능평가 결과서 작성 예시 1**

**[별첨 2] 주사전자현미경 성능평가 결과서 작성 예시 2**


**[별첨 3] 주사전자현미경 성능평가 결과서 작성 예시 3**

**[별첨 4] 연구장비성능평가 결과서 표지 예시 1**

	<b>주사전자현미경 성능평가 절차서</b>	절차서 등록번호	PE-SEM-001-
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정확인일	2022.12.9.

## [별첨 1] 성능평가 결과서 작성 예시 1

<h1 style="margin: 0;">성능평가 결과서</h1> <h2 style="margin: 0;">PERFORMANCE EVALUATION REPORTS</h2>													
결과서번호 : XX-XXXX-XXX	( 2 ) 쪽 중 ( 1 ) 쪽												
<div> <div>1. 의뢰기관</div> <div>기관명 : 000 (주)</div> <div>주 소 : XXXXX</div> </div> <div> <div>2. 평가품명</div> <div>품 명 : 주사전자현미경 배율 50 000x @15 kV</div> <div>제작회사 및 형식 : XXXXX, XXXXX</div> </div> <div> <div>3. 평가일자 : XXXX. XX. XX.</div> </div> <div> <div>4. 평가환경</div> <div style="margin-top: 5px;">             온 도 : ( 20 ± 3 ) °C      상대습도 : ( 50 ± 10 ) %           </div> <div style="margin-top: 5px;">             평가장소 : <input checked="" type="checkbox"/> 고정표준실      <input type="checkbox"/> 이동시설      <input type="checkbox"/> 현장           </div> </div> <div> <div>5. 측정표준의 소급성</div> <p>별첨 평가결과의 단위는 제17차 국제도량형 총회에서 결의된 미터표준에 근거를 두고 있으며, 평가방법은 한국표준과학연구원 발행 “주사전자현미경 영상 배율의 정확도 평가절차 (KRISs XXXXXX-XX-XXX-XXX)”에 따라 수행되었다.</p> <p>평가에 사용한 표준시료 명세</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <th>사용품명</th> <th>제작회사</th> <th>기기번호</th> <th>시험기관</th> </tr> <tr> <td>주사전자현미경</td> <td>XXXX</td> <td>XXXX</td> <td>XXXX</td> </tr> <tr> <td>표준시료</td> <td>XXXX</td> <td>XXXX</td> <td>XXXX</td> </tr> </table> </div> <div> <div>6. 평가결과 : 별첨 연구장비성능평가 결과서 참조</div> <div>7. 측정불확도 : 별첨 연구장비성능평가 결과서 참조</div> </div>		사용품명	제작회사	기기번호	시험기관	주사전자현미경	XXXX	XXXX	XXXX	표준시료	XXXX	XXXX	XXXX
사용품명	제작회사	기기번호	시험기관										
주사전자현미경	XXXX	XXXX	XXXX										
표준시료	XXXX	XXXX	XXXX										
확인	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div>           작성자 :            성 명 : 0 0 0      (서명)         </div> <div>           승인자            직 위 : 책임연구원            성 명 : 0 0 0      (서명)         </div> </div>												
<p>위 평가결과는 국가표준기본법 제 14조 규정에 의거하여 국가측정표준과 소급성이 확립된 측정기로서 평가한 성능평가 결과서임을 증명합니다.</p> <p style="text-align: center; font-weight: bold;">한국표준과학연구원</p> <p style="text-align: center;">원장 ○ ○ ○ (인)</p> <p style="text-align: center;">대전시 유성구 가정로 267, 042-868-5000</p>													

	주사전자현미경 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-SEM-001-
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정확인일	2022.12.9.

## 성능평가 결과서

### PERFORMANCE EVALUATION RESULTS

평가번호(Cer. No.) : xx - xxxxc - xxx

( 2 ) 쪽 중 ( 2 ) 쪽

■ **평가품명** : 주사전자현미경( XXXXXX XX-XXX S/N : XXXX ) 배율 50 000x @15 kV

1) **표준물질** : KRISS CRM 207-01-002\_SN\_1D001-013

2) **SEM** : 검출전자 : 이차전자  
검출기 타입 : SE 검출기, 인렌즈  
가속전압 : 15 kV  
프로브 지름\*/전류\*\* : 1.0 nm/28 pA  
빔체류시간(화소시간) : 10 μs  
작업거리 : 5 mm  
영상배율 : 50 000x  
영상분해능(화소크기) : 2.233 nm  
영상크기 (단위:화소) : 1024 (H) \* 768 (V)

3) **평가방법** : 피치 10 개 이상 나오도록 영상 획득한 후 분석  
분석 프로그램: 장비 자체 소프트웨어

4) **평가결과** :

80.00 nm (인증값) 피치가 81.35 nm ( $U_{k=2} = 0.48$  nm) 로 측정되었음.  
이에 기반하여 아래와 같이 평가값을 제시함

가속전압 15 kV, 배율 50 000x, 작업거리 5 mm


항목	표시값	평가값	불확도***
화소크기, $L_p$	2.233	2.195 nm	0.048 nm
영상너비, HFW	2 287 nm	2 247 nm	49 nm
척도막대	200 nm	196.6 nm	4.3 nm
배율 M	50 000	50 880	1 070

\* 분해능 측정: ISO TS 24597:2011 (E) 미분법(derivataive method), WISE software 사용

\*\* 프로브 전류 측정: ISO TS 21383:2011 pp.30-32, 패러데이컵과 피코암미터 사용


\*\*\*  $k=2$  인 확장불확도



 <b>주사전자현미경 성능평가 절차서</b>	절차서 등록번호	PE-SEM-001-
	제정일	2022.12.9.
	최종 개정확인일	2022.12.9.

## [별첨 2] 성능평가 결과서 작성 예시 2

<h1 style="margin: 0;">성능평가 결과서</h1> <h2 style="margin: 0;">PERFORMANCE EVALUATION REPORTS</h2>													
결과서번호 : xx-xxxx-xxx	( 2 ) 쪽 중 ( 1 ) 쪽												
<p><b>1. 의뢰기관</b>  기관명 : 000 (주)  주 소 : xxxxx</p> <p><b>2. 평가품명</b>  품 명 : 주사전자현미경 배율 5 000x, 100 000x @ 1, 10 kV  제작회사 및 형식 : xxxxx, xxxxxx</p> <p><b>3. 평가일자</b> : xxxx. xx. xx.</p> <p><b>4. 평가환경</b>  온 도 : ( 20 ± 3 ) °C      상대습도 : ( 50 ± 10 ) %  평가장소 : <input checked="" type="checkbox"/> 고정표준실      <input type="checkbox"/> 이동시설      <input type="checkbox"/> 현장</p> <p><b>5. 측정표준의 소급성</b>  별첨 평가결과의 단위는 제17차 국제도량형 총회에서 결의된 미터표준에 근거를 두고 있으며, 평가방법은 한국표준과학연구원 발행 “주사전자현미경 영상 배율의 정확도 평가절차 (KRIS xxxxxx-xx-xxx-xxx)”에 의해 수행되었다.</p> <p>평가에 사용한 표준장비 명세</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 10px;"> <thead> <tr> <th style="width: 25%;">사용품명</th> <th style="width: 25%;">제작회사</th> <th style="width: 25%;">기기번호</th> <th style="width: 25%;">시험기관</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>주사전자현미경</td> <td>xxxx</td> <td>xxxx</td> <td>xxxx</td> </tr> <tr> <td>표준시료</td> <td>xxxx</td> <td>xxxx</td> <td>xxxx</td> </tr> </tbody> </table> <p><b>6. 평가결과</b> : 별첨 연구장비성능평가 결과서 참조  <b>7. 측정불확도</b> : 별첨 연구장비성능평가 결과서 참조</p>		사용품명	제작회사	기기번호	시험기관	주사전자현미경	xxxx	xxxx	xxxx	표준시료	xxxx	xxxx	xxxx
사용품명	제작회사	기기번호	시험기관										
주사전자현미경	xxxx	xxxx	xxxx										
표준시료	xxxx	xxxx	xxxx										
확인	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>작성자 :</p> <p>성 명 : 0 0 0 (서명)</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>승인자</p> <p>직 위 : 책임연구원</p> <p>성 명 : 0 0 0 (서명)</p> </div> </div>												
<p>위 평가결과는 국가표준기본법 제 14조 규정에 의거하여 국가측정표준과 소급성이 확립된 측정기로서 평가한 성능평가 결과서를 증명합니다.</p> <p style="text-align: center;"><b>한국표준과학연구원</b>  원장 ○ ○ ○ (인)</p> <p style="text-align: center;">대전시 유성구 가정로 267, 042-868-5000</p>													

	주사전자현미경 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-SEM-001-2022
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정확인일	2022.12.9.

## 성능평가 결과서

### PERFORMANCE EVALUATION RESULTS

평가번호(Cer. No.) : xx - xxxxc - xxx

( 2 ) 쪽 중 ( 2 ) 쪽

■ **평가품명** : 주사전자현미경 배율 5 000x, 100 000x @ 1, 10 kV

1) **표준물질** : KRIS CRM 207-01-002\_SN\_1D001-013

2) **SEM** : 가속전압 : 1, 10 kV  
작업거리 : 5 mm  
영상배율 : 50 000x, 100 000x  
영상크기 (단위:화소) : 1024 (H) \* 768 (V)

3) **평가방법** : 피치 10 개 (@50 000x) 또는 5 개 (@100 000x) 의 영상 획득후 분석  
영상분석 프로그램: ImageJ

4) **평가결과** :

80.00 nm (인증값) 피치가 81.35 nm ( $U_{k=2} = 0.48$  nm) 로 측정되었음.  
이에 기반하여 아래와 같은 성능평가값을 제시함

가속전압 1 kV


작업거리 (mm)	명목값		평가값		불확도***
	화소크기 (nm)	배율	화소크기 (nm)	배율	
2	2.233	50 000	2.147	52 000	0.58 %
3	2.233	50 000	2.158	51 740	0.58 %
5	2.233	50 000	2.190	50 980	0.58 %
2	1.117	100 000	1.074	104 000	0.66 %
3	1.117	100 000	1.080	103 430	0.66 %
5	1.117	100 000	1.095	102 010	0.66 %

가속전압 10 kV

작업거리 (mm)	명목값		평가값		불확도***
	화소크기 (nm)	배율	화소크기 (nm)	배율	
2	2.233	50 000	2.269	50 800	0.58 %
3	2.233	50 000	2.269	50 800	0.58 %
5	2.233	50 000	2.275	50 940	0.58 %
2	1.117	100 000	1.135	101 650	0.66 %
3	1.117	100 000	1.135	101 600	0.66 %
5	1.117	100 000	1.139	101 930	0.66 %


\*\*\*  $k=2$  인 확장불확도

이상 끝.

	<b>주사전자현미경 성능평가 절차서</b>	절차서 등록번호	PE-SEM-001-
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정확인일	2022.12.9.

### [별첨 3] 성능평가 결과서 작성 예시

<h2 style="margin: 0;">성능평가 결과서</h2> <h3 style="margin: 0;">PERFORMANCE EVALUATION REPORTS</h3>													
결과서번호 : XX-XXXX-XXX	( 3 ) 쪽 중 ( 1 ) 쪽												
<p><b>1. 의뢰기관</b></p> <p>기관명 : 000 (주)</p> <p>주 소 : XXXXX</p> <p><b>2. 평가품명</b></p> <p>품 명 : 주사전자현미경 영상 3 종: A.tif, B.tif, C.tif</p> <p>제작회사 및 형식 : XXXXX, XXXX</p> <p>시료 형태 : 영상파일, tif 포맷</p> <p><b>3. 평가일자</b> : XXXX. XX. XX.</p> <p><b>4. 평가환경</b></p> <p style="text-align: center;">온 도 : ( 20 ± 2 ) °C      상대습도 : ( 50 ± 10 ) %</p> <p style="text-align: center;">평가장소 : <input checked="" type="checkbox"/> 고정표준실      <input type="checkbox"/> 이동시설      <input type="checkbox"/> 현장</p> <p><b>5. 측정표준의 소급성</b></p> <p>별첨 평가결과의 단위는 제17차 국제도량형 총회에서 결의된 미터표준에 근거를 두고 있으며, 평가방법은 한국표준과학연구원 발행 “미분법을 이용한 주사전자현미경 영상의 선명도 성능 평가절차 (KRISS XXXXXX-XX-XXX-XXX)”에 의해 수행되었다.</p> <p>평가에 사용한 표준장비 명세</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <th style="width: 25%;">사용품명</th> <th style="width: 25%;">제작회사</th> <th style="width: 25%;">기기번호</th> <th style="width: 25%;">시험기관</th> </tr> <tr> <td>주사전자현미경</td> <td>XXXX</td> <td>XXXX</td> <td>XXXX</td> </tr> <tr> <td>표준시료</td> <td>XXXX</td> <td>XXXX</td> <td>XXXX</td> </tr> </table> <p><b>6. 평가결과</b> : 별첨 연구장비성능평가 결과서 참조</p>		사용품명	제작회사	기기번호	시험기관	주사전자현미경	XXXX	XXXX	XXXX	표준시료	XXXX	XXXX	XXXX
사용품명	제작회사	기기번호	시험기관										
주사전자현미경	XXXX	XXXX	XXXX										
표준시료	XXXX	XXXX	XXXX										
확인	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>작성자 :</p> <p>성 명 : 0 0 0 (서명)</p> </div> <div> <p>승인자</p> <p>직 위 : 책임연구원</p> <p>성 명 : 0 0 0 (서명)</p> </div> </div>												
<p>위 평가결과는 국가표준기본법 제 14조 규정에 의거하여 국가측정표준과 소급성이 확립된 측정기로서 평가한 성능평가 결과서임을 증명합니다.</p> <p style="text-align: center;"><b>한국표준과학연구원</b></p> <p style="text-align: center;">원장 ○ ○ ○ (인)</p> <p style="text-align: center;">대전시 유성구 가정로 267, 042-868-5000</p>													

	<b>주사전자현미경 성능평가 절차서</b>	절차서 등록번호	PE-SEM-001-
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정확인일	2022.12.9.

## 성능평가 결과서

### PERFORMANCE EVALUATION REPORTS

결과서번호 : xx-xxxx-xxx

( 3 ) 쪽 중 ( 2 ) 쪽

■ 평가품명 : 주사전자현미경 영상의 분해능[선명도] 계산 ( XXXXXX XX-XXX S/N : XXXX )

#### 1) SEM 영상 획득 조건

장비: 주사전자현미경 (O-000, 0000)

검출전자: 이차전자

검출기 타입: 에버하트-손리

가속전압: 15 kV

프로브 전류: 100 pA

빔체류시간(화소시간): 10  $\mu$ s

작업거리: 5 mm

영상크기 (단위:화소): 1024 (H) \* 928 (V)

화소크기: 0.221 nm\*\*

#### 2) 사용한 소프트웨어

프로그래밍: WISE.exe

최종수정일: 2020.11.20

프로그래밍: 박병천 (한국표준과학연구원 xxxxxxxxxxxx)

프로그래밍 언어: 실행파일

#### 3) 선명도 계산 방법

영상 적합성 평가: CNR>10

계산 알고리즘: 미분법 (출처: ISO TS 24597:2011 (E) )

\* CNR: 대비-대-잡음 비 (contrast-to-noise ratio)

\*\* 배율교정 성적서 별도 첨부

KRISs	주사전자현미경 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-SEM-001-
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정확인일	2022.12.9.

성능평가 결과서

PERFORMANCE EVALUATION RESULTS

평가번호(Cer. No.) : xx - xxxxc - xxx ( 3 ) 쪽 중 ( 3 ) 쪽


평가품명 : 주사전자현미경 영상의 분해능[선명도] 계산 ( XXXXXX XX-XXX S/N : XXXX )

4)평가결과 :


번호	평가한 영상 파일명	이진 파일명	선택한 영상크기 (화소수)	평가법			$R_{PX}$ (화소수)	$R_L$ (nm)	비고
				FT	CG	DR			
1	A.tif	BWA.tif	1024x768			O	4.50	1.00	
2	B.tif	BWB.tif	1024x768			O	4.71	1.05	
3	C.tif	BWC.tif	1024x768			O	4.76	1.06	
평균						O	4.53	1.01	


평가한 영상 파일명: 파일명(예:A.tif, B.tif, C.tif) 또는 원본 영상에서 선택된 영상 표시  
이진 파일명: 선택된 영상의 이진 영상 (필요시)  
영상 크기 (화소수): 512x512 또는 다른 크기 (화소수를 명시할 것)  
평가법: FT, CG 또는 DR  
 $R_{PX}$ : 영상 선명도 (화소수)  $R_{PX} = 2\sigma / \sqrt{2}$   
 $R_L$ : 영상 선명도 (nm)  $R_L = L_p \times R_{PX}$  ( $L_p$ :화소크기)

이상 끝.

	<b>주사전자현미경 성능평가 절차서</b>	절차서 등록번호	PE-SEM-001-
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정확인일	2022.12.9.

**[별첨 4] 연구장비성능평가 결과서 표지 예시 1**

<h2 style="margin: 0;">연구장비성능평가 결과서</h2>	
연구장비성능평가 장비명	
신청 기업명	
<p>20XX년 00월 00일</p>	
 <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="font-size: 24px; font-weight: bold;">KRISs</div> <div style="text-align: left;"> <p>한국표준과학연구원</p> <p><small>Korea Research Institute of Standards and Science</small></p> </div> </div>	
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>이 문서는 「연구산업진흥법」 제8조제1항 및 같은 법 시행령 제10조제3항에 따른 연구장비성능평가 결과서로 평가기관의 사전승인 없이는 문서의 일부분만을 발췌·인용하여 사용하거나 배포할 수 없습니다.</p> </div>	

	<b>주사전자현미경 성능평가 절차서</b>	절차서 등록번호	PE-SEM-001-
		제정일	2022.12.9.
		최종 개정확인일	2022.12.9.

## <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
  - 5.1. 해당 장비의 성능평가 결과
  - 5.2. 비교 장비의 성능평가 결과
  - 5.3. 성능평가 항목별 적합성
6. 최종 결론
7. 참고 문헌
8. 특이사항

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