주사전자현미경
성능평가 절차서

2022. 12. 12.

KBSI 한국기초과학지원연구원
KOREA BASIC SCIENCE INSTITUTE

KBSI 한국기초과학지원연구원
KOREA BASIC SCIENCE INSTITUTE

주사전자현미경 성능평가 절차서

Performance Evaluation Procedure of Scanning Electron Microscope

KBSI 한국기초과학지원연구원
KOREA BASIC SCIENCE INSTITUTE

SEM 성능평가 절차서

작성자

성 명	소 속		직 위
이 석 훈	한국기초과학지원연구원	연구장비평가·활용팀	팀장
배 태 성	한국기초과학지원연구원	연구장비평가·활용팀	책임연구원
박 지 인	한국기초과학지원연구원	연구장비평가·활용팀	기술원
조 지 영	한국기초과학지원연구원	연구장비평가·활용팀	과제연구원
이 하 연	한국기초과학지원연구원	연구장비평가·활용팀	과제연구원

목 차

1. 적용 범위 ····· 1
2. 인용 표준 ····· 1
3. 성능평가 내용 및 방법 ····· 2
3.1. 성능평가 대상 장비 ····· 2
3.2. 시료 ····· 3
3.2.1. 배율, 스케일바 및 측정자 정확도 시험용 표준물질 ····· 3
3.2.2. 분해능 시험용 표준물질 ····· 3
3.2.3. 표준물질의 관리 ····· 4
3.3. 환경 조건 ····· 4
3.3.1. 장비 설치 및 측정 환경 ····· 4
3.3.2. 장비 성능평가 장소 ····· 5
3.3.3. 장비 안정화 ····· 5
3.4. 표준물질 측정방법 ····· 6
3.4.1. 표준물질의 고정(Mounting) ····· 6
3.4.2. 주사전자현미경 작동 조건 설정 ····· 6
3.4.3. 디지털 영상 기록(Recording of digital image) ····· 6
3.4.4. 디지털 영상 측정(Measurement of digital image) ····· 6
3.5. SEM 성능평가방법 ····· 8
3.5.1. 성능평가 시험 장비 설정 조건 ····· 8
3.6. 영상 배율 보정 ····· 9
3.6.1. 배율 정확도 시험 ····· 9
3.6.2. 스케일바 정확도 시험 ····· 10
3.6.3. 측정자 정확도 시험 ····· 11
3.7. 영상 분해능 평가 ····· 12

3.7.1. 분해능 측정 시험 ····· 12

표 차 례

표 1. 배율/스케일바/측정자 시험용 표준물질 (×500 ~ ×100k) ····· 3

표 2. 분해능 측정용 표준물질 ····· 4

표 3. 장비 측정 환경 조건 ····· 4

표 4. (예) 배율, 스케일바 및 측정자 정확도 시험 조건 ····· 8

표 5. 성능평가 항목 및 표시 방법 ····· 8

그 림 차 례

그림 1. 주사전자현미경 구성 ····· 2

그림 2. 디지털 영상 내 패턴 측정 영역 ····· 7

그림 3. 이미지 분석 프로그램의 배율 정확도 시험 디지털 영상 ····· 9

그림 4. 이미지 분석 프로그램의 스케일바 정확도 시험 디지털 영상 ····· 11

그림 5. 장비 측정자 프로그램의 측정자 정확도 시험 디지털 영상 ····· 12

그림 6. (a): 원본 디지털 영상, (b): (a)를 CNR ≥ 10 으로 변환한 영상 ····· 13

그림 7. (a): Binary 모드 변경 후 Dilate averaging 영상, (b): 인접한 두 입자 간 Gary value 환산 영역, (c): 분해능 측정점 위치 ····· 14

별첨 제 1호. 연구장비성능평가 결과서

Appendix A. 성능평가 결과 예시

Appendix B. 시험용 표준물질 Pelcotec 690-01 인증서

1. 적용 범위

본 절차서는 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, 이하 SEM)의 성능평가를 위한 것으로, 인증표준물질(Certified Reference Material, 이하 CRM) 또는 표준물질(Reference Material, 이하 RM)을 사용하여 배율 정확도, 스케일바 정확도, 측정자 정확도와 분해능을 확인한다.

2. 인용 표준

다음 표준문서를 인용하여 주사전자현미경에 대한 성능평가를 진행한다.

[1] KS D ISO 16700 : 2004, 마이크로빔 분석 - 주사전자현미경- 영상 배율 교정 지침(국가기술표준원)
[2] KS I 0051 : 1999, 주사 전자 현미경 시험 방법 통칙(국가기술표준원)
[3] KS D ISO 22493 : 2014, 마이크로빔 분석 - 주사전자현미경 - 용어(국가기술표준원)
[4] ISO TS 24597 : 2011, Microbeam analysis - Scanning electron microscopy - Methods of evaluating image sharpness

3. 성능평가 내용 및 방법

3.1. 성능평가 대상 장비

주사전자현미경은 정밀하게 집속한 전자 프로브를 시료 위에 2차원적으로 주사함으로써 시료에서 방출되는 신호(2차 전자, 후방산란전자 등)를 검출하여 확대 화상을 얻는 장비이다. 주사전자현미경은 그림 1과 같이 전자총부, 렌즈부, 편향 주사부, 시료실·시료 스테이지부, 검출기부, 진공 배기부, 전원·제어부, 신호 처리·화상 표시부로 구성된다.



그림 1. 주사전자현미경 구성

3.2. 시료

본 성능평가법에서 사용되는 표준물질은 아래와 같은 규격을 참고하여 성능평가 항목에 맞는 표준물질을 선정한다.

3.2.1. 배율, 스케일바 및 측정자 정확도 시험용 표준물질

배율 정확도 시험, 스케일바 정확도 시험 및 측정자 정확도 시험은 교정하고자 하는 배율, 스케일바, 측정자 시험에 적합한 피치 패턴을 포함하고, 외부 오염원으로부터 안정한 표준물질(표 1)을 사용하여 본 시험을 진행한다.

표 1. 배율/스케일바/측정자 시험용 표준물질 (×500 ~ ×100k)

Name	제조사	Product No.	크기	Pitch pattern
Pelcotec 690-01	Ted Pella	690-01	2.5 mm × 2.5 mm	2.0 mm
				1.0 mm
				0.5 mm
				0.10 mm
				50 μm
				10 μm
				5 μm
				2 μm
				1 μm
				500 nm
				250 nm
				100 nm

표준물질의 전체 크기는 2.5 mm × 2.5 mm 이며, 2.0 mm, 1.0 mm, 0.5 mm, 0.10 mm, 50 μm, 10 μm, 5 μm, 2 μm, 1 μm, 500 nm, 250 nm, 100 nm의 X축 피치 패턴과 Y축 피치 패턴으로 구성되어 있다.

3.2.2. 분해능 시험용 표준물질

카본 기판 위에 금을 작은 입자로 증착한 물질을 분해능 측정 표준물질로 사용한다. 시험에 사용되는 표준물질의 사양은 표 2와 같다.

표 2. 분해능 측정용 표준물질

Name	제조사	Product No.	비고
Gold on carbon	Ted Pella	617-2	Particle size range : 3 nm - 50 nm
Gold on carbon	Ted Pella	617-3	Particle size range : 2 nm - 30 nm

3.2.3. 표준물질의 관리

표준물질의 변형을 최소화하기 위해 일정한 온/습도가 유지되는 진공 데시케이터에 보관한다.

표준물질은 주어진 유효기간 내에서 사용하며 유효기간이 지난 표준물질은 폐기한다. 표준물질의 제조업체로부터 유효기간이 제공되지 않는 경우, 입고 후 5년을 유효기간으로 본다. 단, 시료 표면의 오염이 발생하여 측정 시료로써 유효성이 보장되지 않을 시에는 즉시 폐기한다.

3.3. 환경 조건

3.3.1. 장비 설치 및 측정 환경

주사전자현미경의 안정한 유지·관리 및 원활한 성능 발휘를 위하여 표 3과 같은 환경에서 설치 및 측정한다. 장비 성능평가 보고서 작성 시 측정 환경 조건을 명시한다.

표 3. 장비 측정 환경 조건

항목	측정 환경 조건
온도	20 ± 5 ℃
습도	~ 70 % R.H.
진동/소음	35 dB 이하
자기장	0.5 mG 이하

3.3.2. 장비 성능평가 장소

장비 성능평가는 환경 조건 및 필요 요건을 충족한 평가기관 내 지정된 장소에서 진행하는 것을 우선으로 한다. 단, 제조사와의 협의에 따라 제조사가 제공하는 환경 조건 및 필요 요건을 만족하는 장소에서 진행할 수 있다.

3.3.3. 장비 안정화

장비 설치 후 진공도 및 빔 정렬(beam alignment) 등 정상 작동을 확인하고 성능평가를 진행한다.

3.4. 표준물질 측정방법

3.4.1. 표준물질의 고정(Mounting)

배율, 스케일바, 측정자 정확도 및 분해능 시험 표준물질은 도전성 페이스트 또는 도전성 양면 테이프 등을 이용하여 시료 홀더에 고정한 후, 완전히 건조시킨다.

3.4.2. 주사전자현미경 작동 조건 설정

a. 주사전자현미경 챔버 내로 표준물질 투입 후 정상 가동 가능 진공도 도달 시점까지 대기한다.
b. 3.3.1항의 환경 조건에서 표준물질의 이미지 분석을 진행한다.
   1) 영상모드(2차 전자 또는 후방산란전자)를 선택한다.
   2) 시료의 표면이 전자빔의 축과 수직이 되도록 수평 조정한다.
   3) 가속전압, 작동 거리 및 배율을 설정한다. (3.5.1항 참고)
   4) 영상 화면에 시료가 선명하게 보이도록 초점/비점수차/조리개 위치를 조절한다.

3.4.3. 디지털 영상 기록(Recording of digital image)

a. 측정할 피치 패턴은 화면에서 Y축 평행/X축 수직, X축 평행/Y축 수직이 되도록 시료를 정렬한다.
b. 측정범위는 모니터 화면 길이 및 폭의 약 80% 이내에 있는 피치 패턴을 대상으로 한다.
c. 영상 기록 시 평가 장비에서 구현 가능한 설정 조건 내에서 주사 속도는 느리게, 화질은 고화질로 설정하여 진행한다.
d. 디지털 영상 파일은 512×512 화소 이상으로 하고, TIFF 또는 BMP 형식으로 저장한다.

3.4.4. 디지털 영상 측정(Measurement of digital image)

저장된 디지털 영상 파일은 장비 제조사 디지털 영상 출력 기준으로 이미지 분석 프로그램에 로딩하여 배율, 스케일바 및 프로그램 측정자의 정확도를 측정한다.

a. 디지털 영상 내 모서리의 찌그러짐 효과를 최소화하기 위해 모서리 근처에서의 측정을 피한다. 측정은 영상의 중앙 80% 영역 이내에서 진행한다. (그림 2 참고)

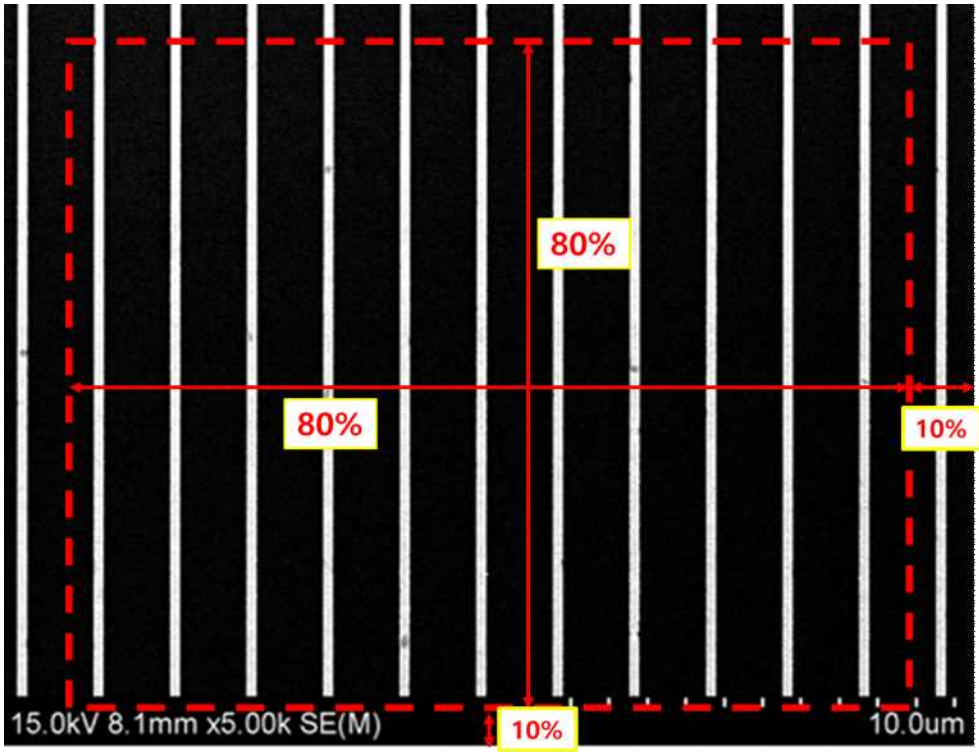


그림 2. 디지털 영상 내 패턴 측정 영역

b. 측정 피치 패턴의 개수는 10개 내외로 한다. 단, 피치의 크기(간격) 및 배율의 조건에 따라 측정 피치 개수를 조절한다.

c. 피치와 스케일바의 경우 끝단에서 끝단(왼쪽 끝-왼쪽 끝, 오른쪽 끝-오른쪽 끝)의 길이를 측정한다.

d. 측정한 동일 이미지 내에서 10회 이상 반복 측정하여 평균값을 계산한다.

3.5. SEM 성능평가방법

성능평가 방법은 “KS D ISO 16700”, “KS I 0051”과 “ISO/TS 24597” 을 준용하여 평가한다.

3.5.1. 성능평가 시험 장비 설정 조건

배율, 스케일바 및 측정자 정확도 시험 조건은 표 4와 같다.
성능평가는 장비 성능이 구현 가능한 범위 내에서 시험한다.
단, 제조사와 협의에 따라 장비 설정 조건 및 갯수를 변경할 수 있다.

표 4. (예) 배율, 스케일바 및 측정자 정확도 시험 조건

구분	가속전압 [kV]	작동 거리 [mm]	배율 [×]
시험조건	1	4	500
			1,000
	5	8	5,000
			10,000
	10	15	50,000
	15		100,000

표 5. 성능평가 항목 및 표시 방법

성능평가 항목		표시 방법	비 고
영상 배율 보정	배율 정확도	%	분석조건 명시 (예) 가속전압 [kV], 작동 거리 [mm], 배율[×]
	스케일바 정확도	%	
	측정자 정확도	%	
영상 분해능 평가	분해능 측정	nm	

3.6. 영상 배율 보정

3.6.1. 배율 정확도 시험

a. X축의 배율 정확도 시험을 위하여 디지털 영상 크기에 해당하는 픽셀 수($N_{W,x}$)를 얻는다.
b. 디지털 영상 측정 피치 길이(D)에 해당하는 픽셀 수(N_D)를 이미지 분석 프로그램을 이용하여 얻는다.
c. 디지털 영상 가로길이(W_x)에 해당하는 픽셀 수($N_{W,x}$)와 디지털 영상 측정 피치 길이(D)에 해당하는 픽셀 수(N_D)를 이용하여 디지털 영상 측정 피치 길이(D)를 구한다.

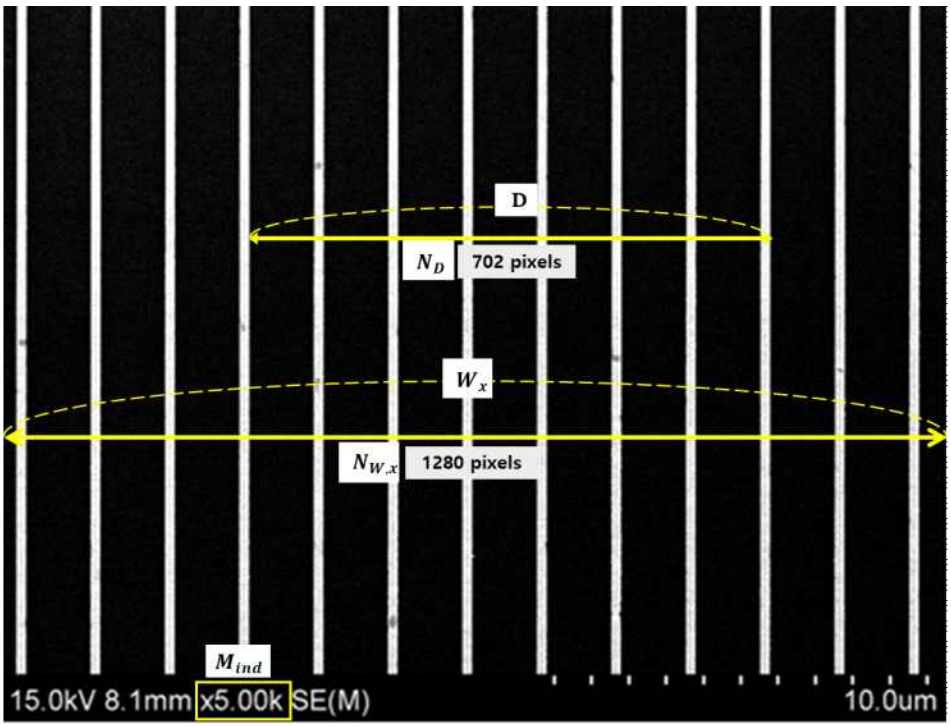


그림 3. 이미지 분석 프로그램의 배율 정확도 시험 디지털 영상

$$D = W_x \times \frac{N_D}{N_{W,x}}$$

D : 디지털 영상에서 측정한 피치 길이(μm)
N_D : 디지털 영상 측정 피치 길이에 해당하는 픽셀 수
W_x : 장비 제조사 디지털 영상 출력 기준 가로길이(그림 3)
$N_{W,x}$: 디지털 영상 가로길이에 해당하는 픽셀 수

e. 다음 식에 의해 배율(M)을 결정한다.

$$M = \frac{D}{d}$$

M : 배율
d : 표준물질의 실제 피치 길이(표준물질 인증서 참고)

f. 배율의 퍼센트 정확도(A_M)는 다음 식과 같이 배율의 차이(ΔM)를 계산하여 결정한다.

$$\Delta M = |M - M_{ind}| = |\frac{D}{d} - M_{ind}|$$

$$A_M = (1 - \frac{\Delta M}{M_{ind}}) \times 100$$

M_{ind} : 지시 배율(그림 3)

g. Y축의 배율 정확도 시험은 상기 a~f까지의 방법을 준용하여 진행한다.

3.6.2. 스케일바 정확도 시험

a. 스케일바 정확도 시험을 위하여 디지털 영상 출력에서 표준물질의 실제 피치 길이(d)의 픽셀 수(N_d)를 이미지 분석 프로그램을 이용하여 얻는다.
b. 디지털 영상 출력에서 표준물질의 실제 피치 길이(d)의 픽셀 수(N_d)와 스케일바 길이(L)에 해당하는 픽셀 수(N_L)를 측정하여 스케일바 길이(L)을 구한다.

$$L = d \times \frac{N_L}{N_d}$$

L : 디지털 영상에서 측정한 스케일바 길이(그림 4)
N_L : 디지털 영상 측정 스케일바 길이에 해당하는 픽셀 수
d : 표준물질의 실제 피치 길이(표준물질 인증서 참고)
N_d : 표준물질의 실제 피치 길이에 해당하는 픽셀 수

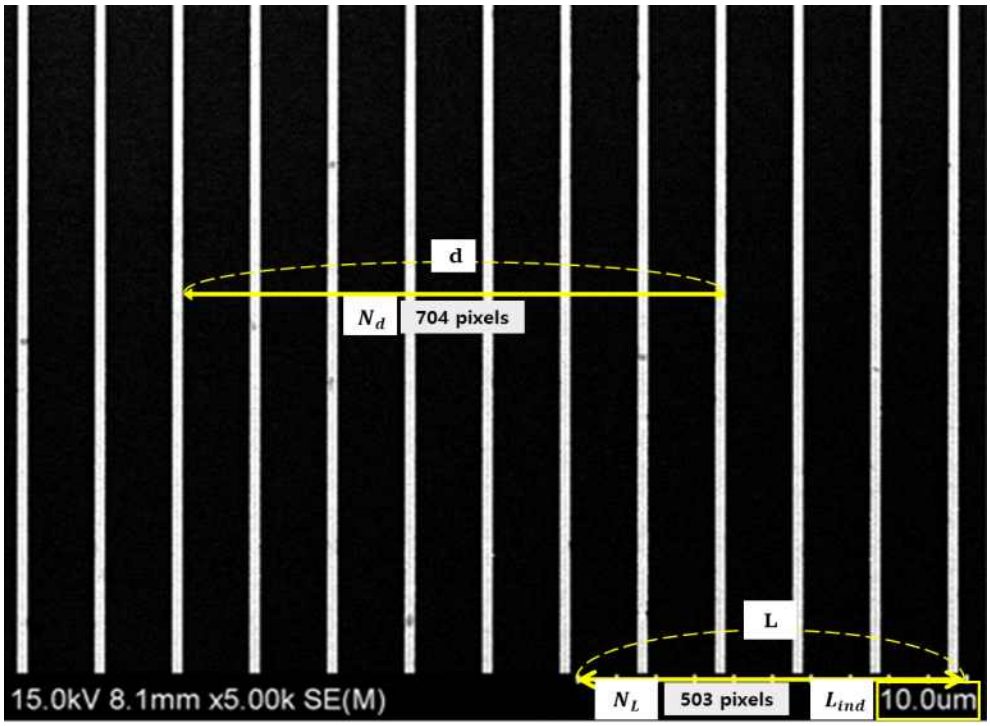


그림 4. 이미지 분석 프로그램의 스케일바 정확도 시험 디지털 영상

c. 스케일바의 퍼센트 정확도(A_S)는 다음 식과 같이 스케일바 길이 차이($\triangle L$)를 계산하여 결정한다.

$$\Delta L = |L - L_{ind}|$$

$$A_S = (1 - \frac{\Delta L}{L_{ind}}) \times 100$$

L : 디지털 영상에서 측정한 스케일바의 길이
L_{ind} : 디지털 영상에서 스케일바의 지시 길이(그림 4)

3.6.3. 측정자 정확도 시험

a. 장비의 측정자 프로그램으로 피치 길이(P)를 측정한다.
b. 측정자 프로그램의 피치 길이(P)와 표준물질의 실제 피치 길이(d = 피치 길이 × 피치 갯수)의 차이(ΔP)를 계산한다.

$$\Delta P = |P - d|$$

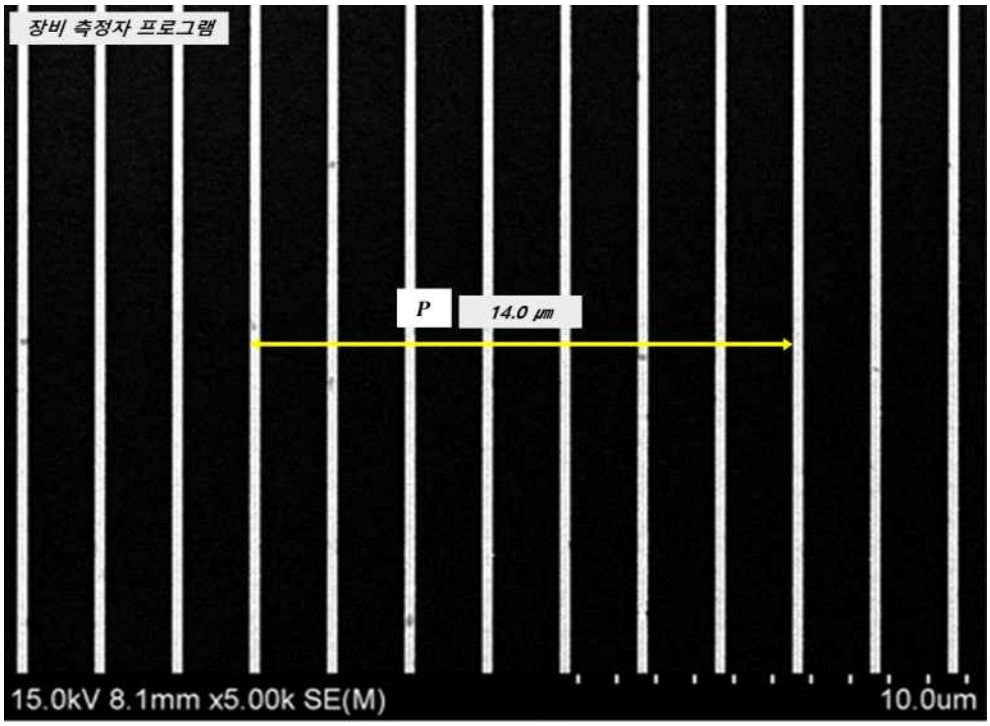


그림 5. 장비 측정자 프로그램의 측정자 정확도 시험 디지털 영상

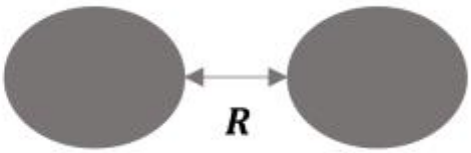
c. 측정자의 퍼센트 정확도(A_P)는 다음 식과 같이 계산한다.

$$A_P = (1 - \frac{\Delta P}{d}) \times 100$$

d : 표준물질의 실제 피치 길이(표준물질 인증서 참고)

3.7. 영상 분해능 평가

3.7.1. 분해능 측정 시험



R = 최소 입자 간격 (분해능)

분해능 측정 시험은 두 입자 사이의 최소 간격을 측정하는 미세간격 측정법 (Gap method)을 적용한다.

분해능 측정 조건(가속전압, 작동 거리, 배율)은 장비 제조사에서 제시한 조건

을 기준으로 한다.

3.7.1.1. 분해능 측정 절차

a. 분해능 측정 디지털 영상은 CNR(Contrast-to-noise ratio) 10 이상인 영상 파일을 이용한다.
   단, 장비 내 CNR 기능이 없는 경우, 이미지 분석 프로그램을 이용하여 CNR ≥ 10인 영상을 선정한다. (그림 6. (b))
b. 선정된 디지털 영상은 이미지 분석 프로그램을 통해 Binary 모드로 전환한다.
c. Binary 이미지에서 최소 입자 간격을 선택하여 두 입자의 중심을 연결한 선(축)을 따라 Gray value의 변화(Y축)를 그래프로 나타낸다. (그림 7. (C))
d. 그래프상에서 Gray value = 0(인접한 두 입자 구별) 구간이 최소 1점 이상인 입자 간을 분해능 측정 대상으로 한다.
e. 분해능은 Gray value/2 위치에서의 간격으로 측정한다. (그림 7. (C))

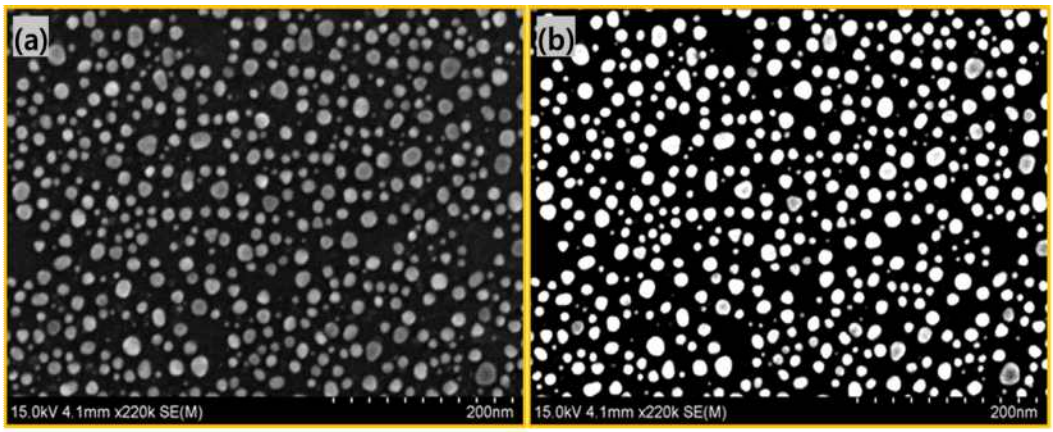


그림 6. (a): 원본 디지털 영상, (b): (a)를 CNR ≥ 10 으로 변환한 영상

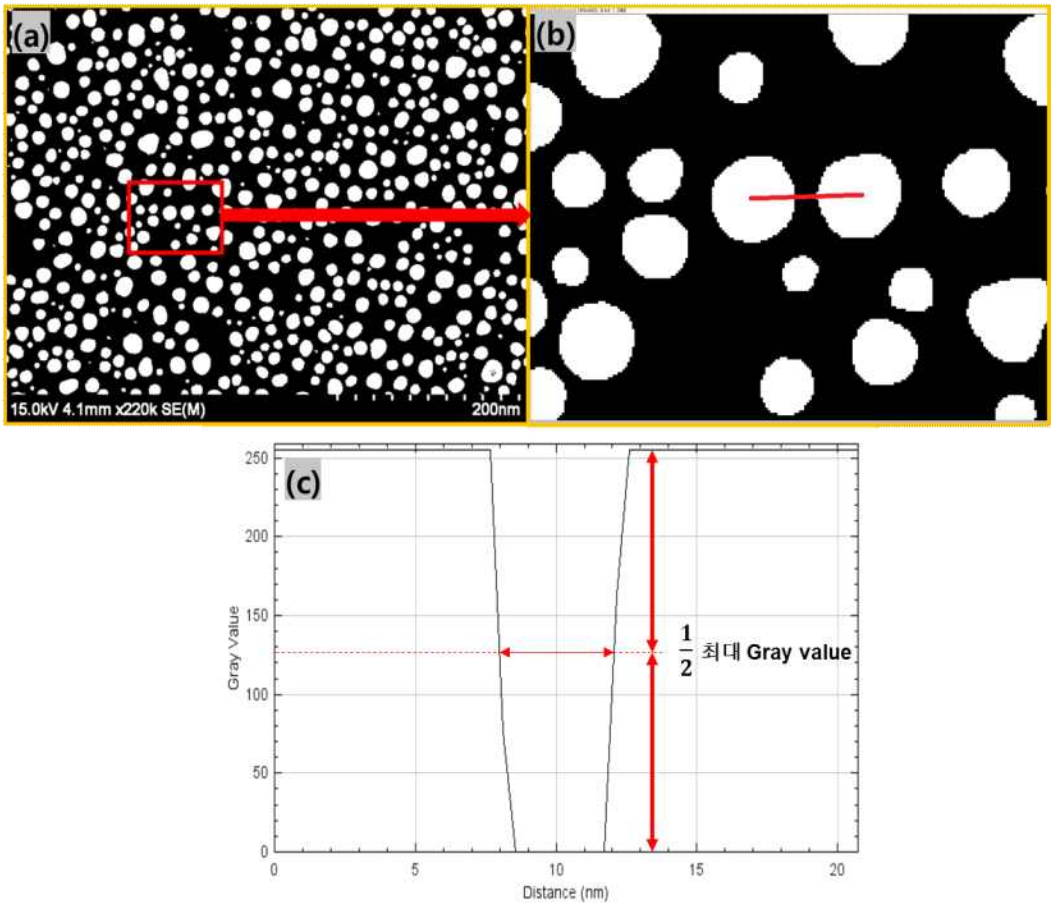


그림 7. (a): Binary 모드 변경 후 Dilate averaging 영상, (b): 인접한 두 입자 간 Gray value 환산 영역, (c): 분해능 측정점 위치

[별첨 제 1호 (연구장비성능평가 결과서)]

연구장비성능평가 결과서

연구장비성능평가 장비명	
신청 기업명	

0000년 00월 00일

한국기초과학지원연구원

이 문서는「연구산업진흥법」제8조 제1항 및 같은 법 시행령 제10조 제3항에 따른 연구장비성능평가 결과서로 평가기관의 사전승인 없이는 문서의 일부분만을 발췌·인용하여 사용하거나 배포할 수 없습니다.

< 목 차 >

1. 성능평가 장비의 개요 및 구성

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
3.1. 영상 배율 보정
3.1.1 배율 정확도
3.1.2 스케일바 정확도
3.1.3 측정자 정확도
3.2. 영상 분해능 평가
3.2.1 분해능 측정

4. 성능평가 수행 일정 및 세부 사항
4.1. 성능평가 일정
4.2. 성능평가 장소
4.3. 성능평가 환경
4.4. 성능평가 표준물질
4.5. 성능평가 담당자

5. 성능평가 결과
5.1. 대상 장비의 성능평가 결과
5.2. (해당 시) 비교 장비의 성능평가 결과
5.3. 최종 검토 의견서

6. 특이사항

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

Appendix A. 성능평가 결과 예시

본 Appendix는 위 성능평가방법에 따라 진행한 결과의 일부를 예시로 나타내었다.

1. 영상 배율 보정

1.1 배율 정확도 시험

배율 정확도 시험 방법은 장비 제조사의 이미지 출력 기준에 따라 이미지를 로딩하여 피치 패턴의 거리를 측정하고, 측정된 피치 패턴의 거리와 디지털 영상 출력 기준 가로길이를 비교하여 배율의 정확도를 계산하였다.

$$D = N_D \times \frac{W_x}{N_{W,x}}$$

D : 디지털 영상에서 측정한 피치 길이(μm)
N_D : 디지털 영상 측정 피치 길이에 해당하는 픽셀 수
W_x : 장비 제조사 디지털 영상 출력 기준 가로길이(그림 3)
$N_{W,x}$: 디지털 영상 가로길이에 해당하는 픽셀 수

$$M = \frac{D}{d}$$

M : 배율
d : 표준물질의 실제 피치 길이(표준물질 인증서 참고)

배율의 퍼센트 정확도(A_M)는 다음 식과 같이 배율의 차이(ΔM)를 계산하여 결정한다.

$$\Delta M = |M - M_{ind}| = |\frac{D}{d} - M_{ind}|$$

$$A_M = (1 - \frac{\Delta M}{M_{ind}}) \times 100$$

피치 거리 10회 반복 측정의 평균 픽셀 수(N_D)를 측정하여 배율 정확도(A_M)를 계산한다. 가속전압 15.0 kV, 작동 거리 8.0 mm, ×5.00k 의 조건에서 배율정확도 시험 결과는 표 1과 같다.

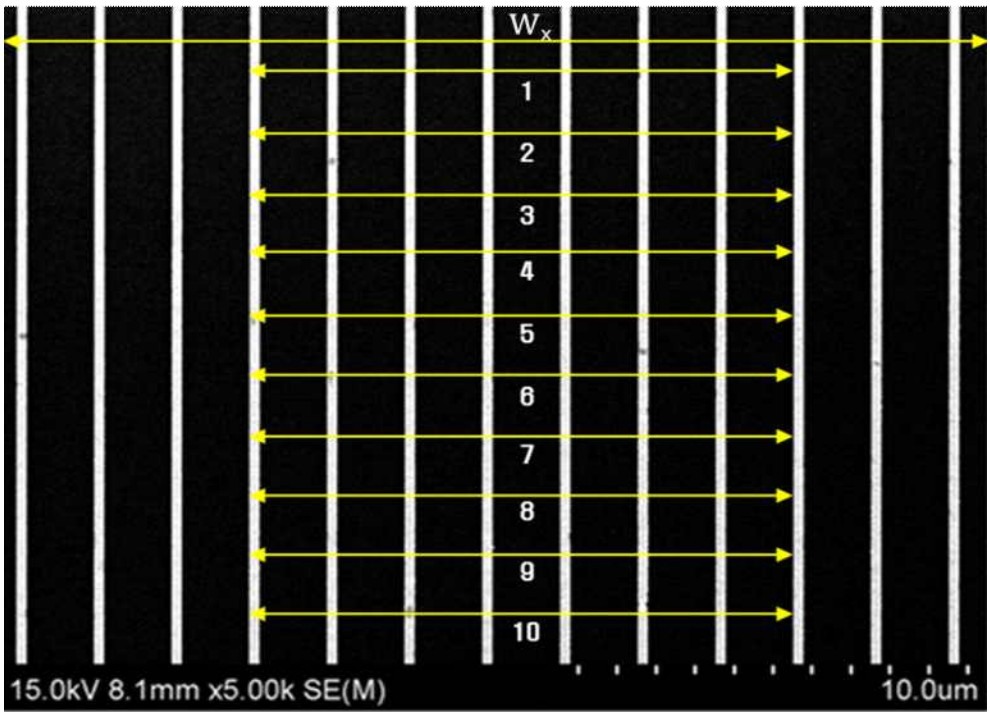


그림 1. (예) X축의 배율 정확도 시험

표 1. (예) 15.0 kV, 8.0 mm, ×5.00k 배율 정확도 시험 결과

W_x [mm]	$N_{W,x}$ [pixel]	D [㎛]	N_D [pixel]	M [×]	A_M [%]
127	1280	69550	701	4968.02	99.36

1.2 스케일 정확도 시험

스케일 정확도 시험은 장비 제조사의 이미지 출력 기준에 따라 이미지를 로딩하여 측정된 스케일바의 길이와 실제 피치 길이를 비교하여 스케일바의 정확도를 계산하였다.

$$L = d \times \frac{N_L}{N_d}$$

L : 디지털 영상에서 측정한 스케일바 길이(그림 4)
N_L : 디지털 영상 측정 스케일바 길이에 해당하는 픽셀 수
d : 표준물질의 실제 피치 길이(표준물질 인증서 참고)
N_d : 표준물질의 실제 피치 길이에 해당하는 픽셀 수

스케일바의 퍼센트 정확도(A_S)는 다음 식과 같이 스케일바 길이 차이($\triangle L$)를 계산하여 결정한다.

$$\Delta L = |L - L_{ind}|$$

$$A_S = (1 - \frac{\Delta L}{L_{ind}}) \times 100$$

L_{ind} : 디지털 영상에서 스케일바의 지시 길이(그림 4)

표준물질의 실제 피치 거리 10회 반복 측정의 평균 픽셀 수(N_d)를 측정하여 스케일바 정확도(A_S)를 계산한다. 가속전압 15.0 kV, 작동 거리 8.0 mm, ×5.00k 의 조건에서 스케일바 정확도 시험 결과는 표 2와 같다.

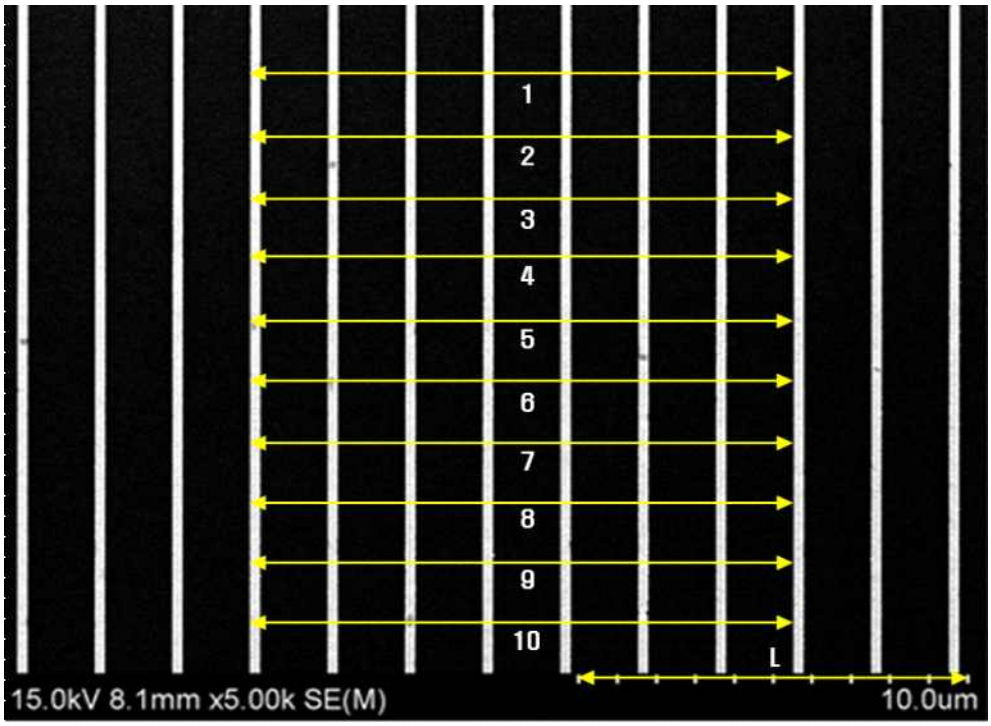


그림 2. (예) X축의 스케일바 정확도 시험

표 2. (예) 15.0 kV, 8.0 mm, ×5.00k 스케일바 정확도 시험 결과

d [㎛]	N_d [pixel]	L [㎛]	N_L [pixel]	A_S [%]
14	701	10.01	501	99.94

1.3 측정자 정확도 시험

측정자 정확도 시험은 장비 제조사의 이미지 출력 기준에 따라 이미지를 로딩하여 장비의 측정자 프로그램에서 측정한 피치 길이와 실제 피치 길이를 비교하여 측정자 정확도를 계산하였다.

$$\Delta P = |P - d|$$

측정자의 퍼센트 정확도(A_P)는 다음 식과 같이 계산한다.

$$A_P = (1 - \frac{\Delta P}{d}) \times 100$$

P : 장비의 측정자 프로그램으로 측정한 피치 길이
d : 표준물질의 실제 피치 길이(표준물질 인증서 참고)

표준물질의 실제 피치 거리 10회 반복 측정의 평균 픽셀 수(N_d)를 측정하여 스케일 바 정확도(A_S)를 계산한다. 가속전압 15.0 kV, 작동 거리 8.0 mm, ×5.00k 의 조건에서 측정자 정확도 시험 결과는 표 3과 같다.

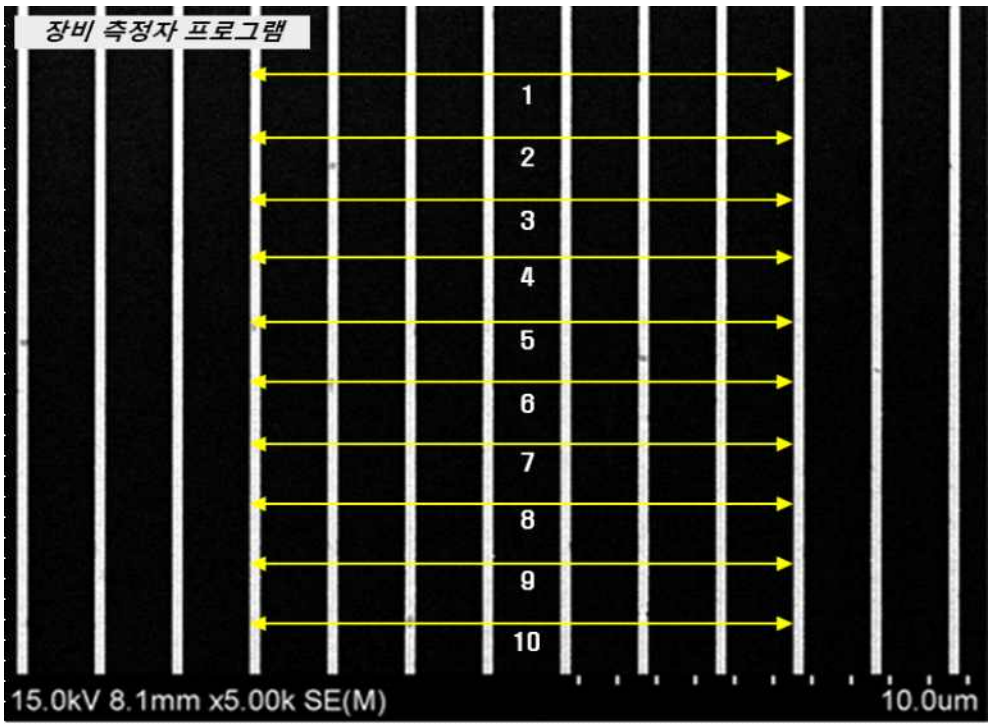


그림 3. (예) X축의 측정자 정확도 시험

표 3. (예) 15.0 kV, 8.0 mm, ×5.00k 측정자 정확도 시험 결과

P [μm]	A_p [%]
14.0	100

2. 영상 분해능 평가

2.1 분해능 시험

분해능 시험은 장비 제조사의 이미지 출력 기준에 따라 이미지를 로딩하여 최소 입자 간격을 측정한다.

분해능 측정 조건(가속전압, 작동 거리, 배율)은 장비 제조사에서 제시한 조건을 기준으로 한다. 해당 제조사/장비에서 제시한 분해능(1.0 nm)은 15.0 kV/ WD 4.0 mm/ ×220k에서 시험하였다.

시험 절차는 다음 그림 4 ~ 8과 같으며 시험 결과는 표 4에 나타내었다.

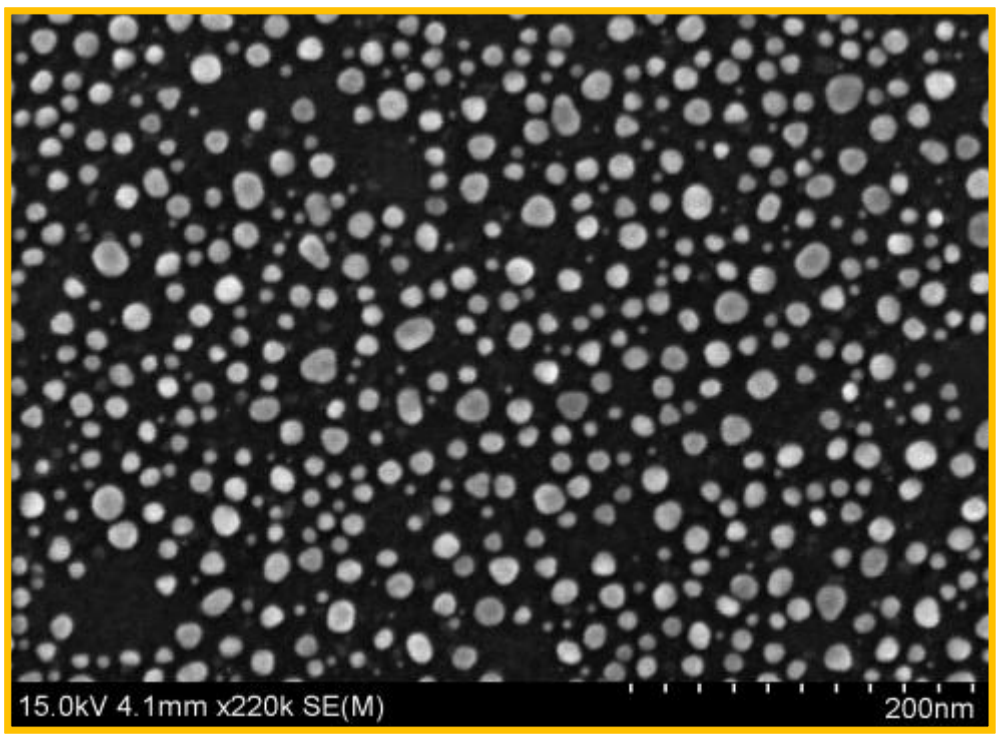


그림 4. 분해능 측정용 표준물질 영상

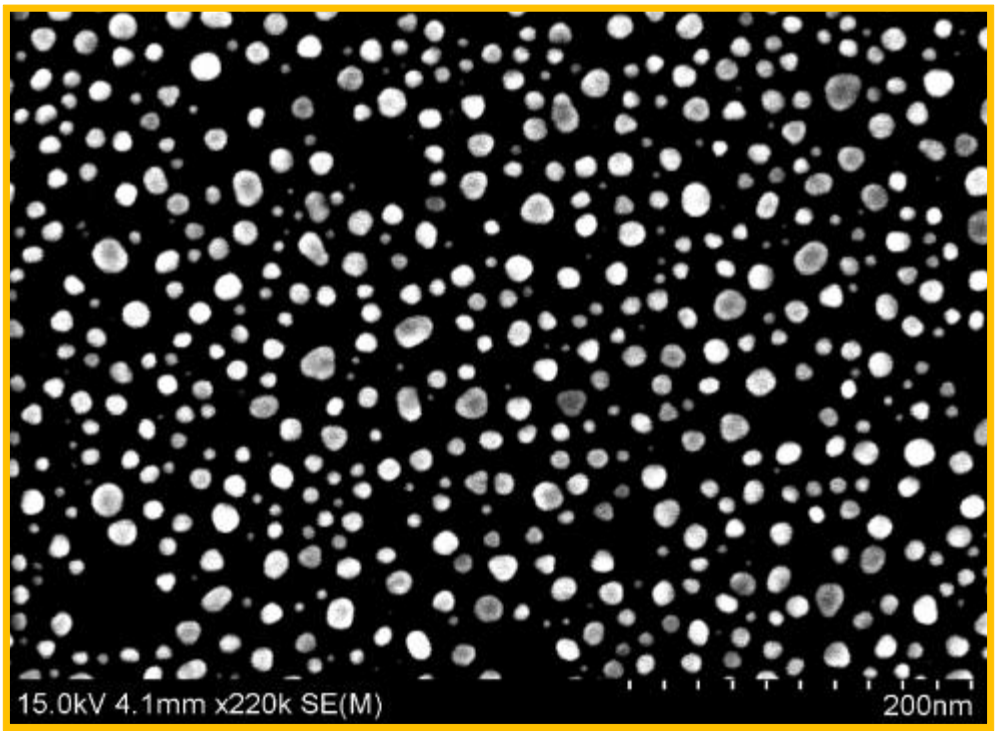


그림 5. CNR ≥ 10 영상

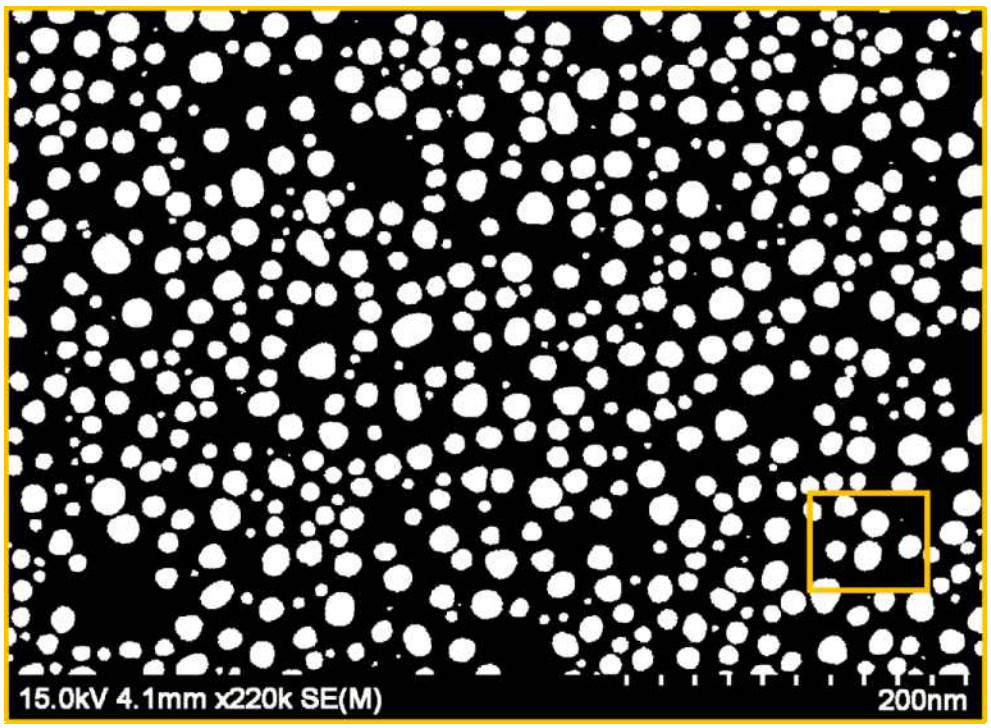


그림 6. Binary 이미지

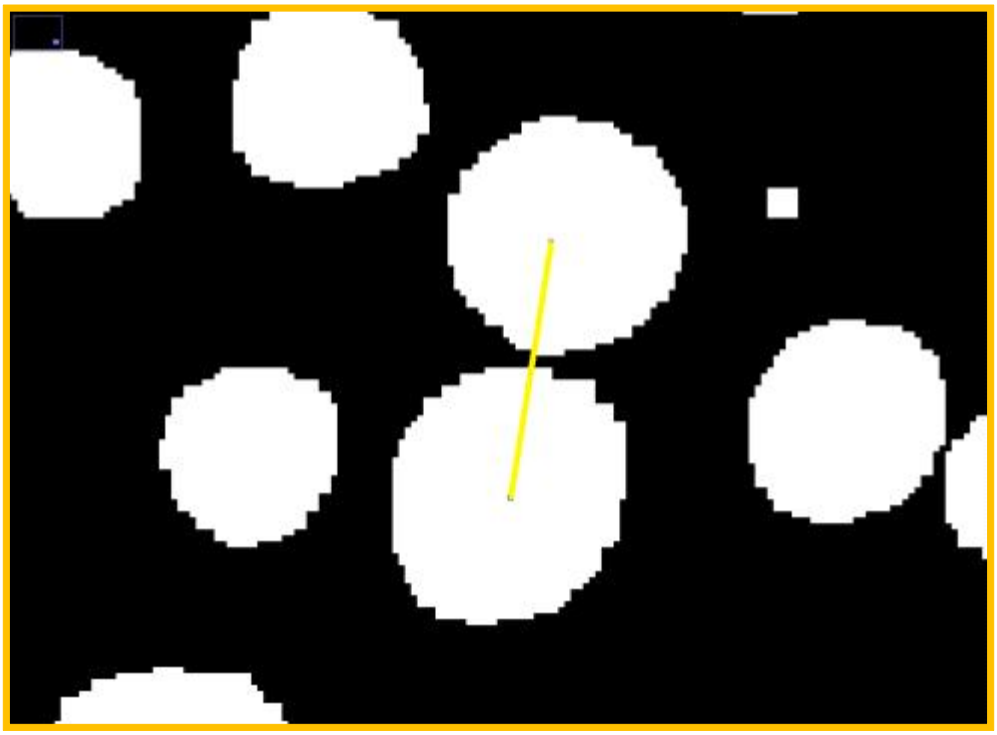


그림 7. 인접한 두 입자 간 Gary value 환산 영역

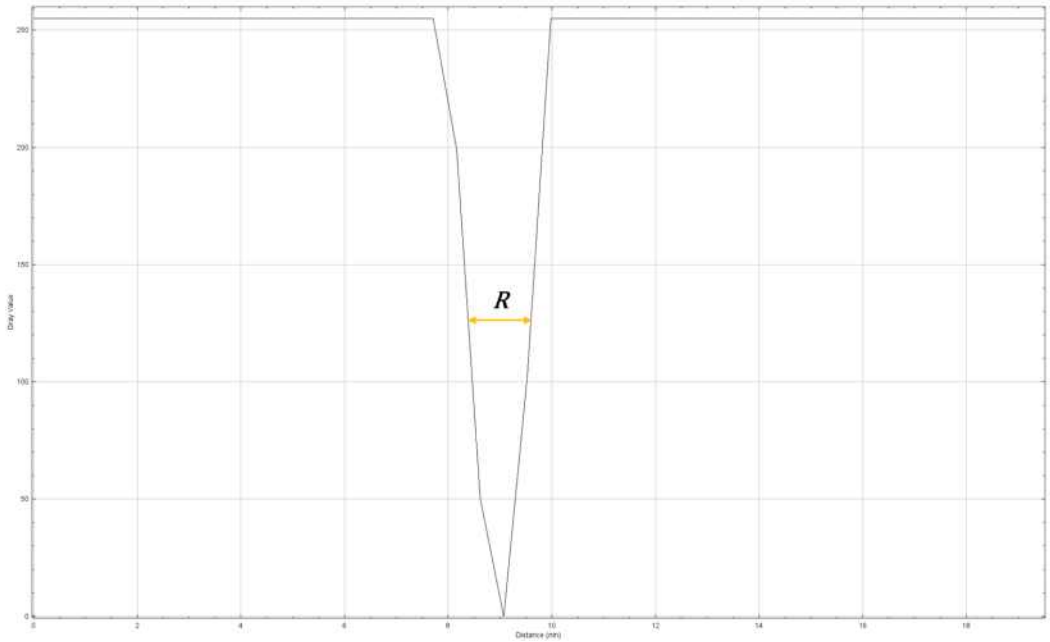


그림 8. Gray value/2 위치에서의 거리

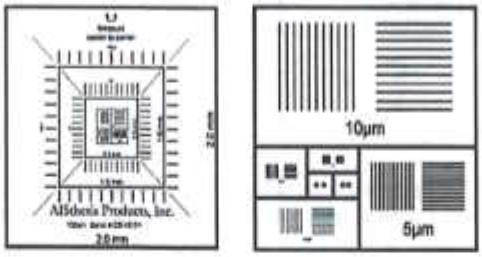
표 4. 분해능 시험 결과

조건 / 가속전압 [kV]	배율	작동 거리 [mm]	분해능 [nm]
15	220,000	4.0	1.17

Appendix B. 시험용 표준물질 Pelcotec 690-01 인증서

AISthesis Products, Inc.
Advanced Imaging Products for Nanotechnology, Engineering and Life Sciences

Certificate of Calibration for
Pelcotec™ XY-Critical Dimension Standard



Product Number: **Pelcotec™** 690-01 CDMS-XY-0.1C

Product Description: 2.5x2.5mm **Pelcotec™** 2mm-100nm XY-Critical Dimension Magnification Standard

Product Serial Number: CD-YC01-3732

Manufactured for and Distributed by:

TED PELLA, INC.
Microscopy Products for Science and Industry

The accuracy of these products was determined by reference comparison to working standards traceable to the National Institute of Standards and Technology (NIST).

Line	Direction	Certified average pitch	Number of lines averaged	Certified distance between first and last line (1σ)	Total expanded uncertainty (3σ)
2.0mm	X	2.00 mm	2	2.00 mm ± 0.03%	± 0.09%
1.0mm	X	1.00 mm	2	1.00 mm ± 0.03%	± 0.09%
0.5mm	X	0.500 mm	2	0.500 mm ± 0.03%	± 0.09%
0.10mm	X	99.97 µm	11	1.00 mm ± 0.03%	± 0.09%
50µm	X	49.98 µm	11	0.500 mm ± 0.03%	± 0.09%
10µm	X	10.00 µm	11	99.97 µm ± 0.03%	± 0.09%
5µm	X	5.00 µm	12	54.99 µm ± 0.03%	± 0.09%
2µm	X	2.00 µm	16	30.00 µm ± 0.03%	± 0.09%
1µm	X	1.00 µm	17	16.02 µm ± 0.03%	± 0.09%
500nm	X	500.7 nm	20	9.51 µm ± 0.03%	± 0.09%
250nm	X	250.7 nm	21	5.01 µm ± 0.03%	± 0.09%
100nm	X	100.3 nm	52	5.11 µm ± 0.03%	± 0.09%
2.0mm	Y	2.00 mm	2	2.00 mm ± 0.03%	± 0.09%
1.0mm	Y	1.00 mm	2	1.00 mm ± 0.03%	± 0.09%
0.5mm	Y	0.500 mm	2	0.500 mm ± 0.03%	± 0.09%
0.10mm	Y	99.92 µm	11	1.00 mm ± 0.03%	± 0.09%
50µm	Y	49.95 µm	11	0.500 mm ± 0.03%	± 0.09%
10µm	Y	9.99 µm	11	99.92 µm ± 0.03%	± 0.09%
5µm	Y	5.02 µm	12	55.19 µm ± 0.03%	± 0.09%
2µm	Y	2.00 µm	16	30.00 µm ± 0.03%	± 0.09%
1µm	Y	1.00 µm	17	16.03 µm ± 0.03%	± 0.09%
500nm	Y	501.0 nm	20	9.52 µm ± 0.03%	± 0.09%
250nm	Y	250.8 nm	21	5.02 µm ± 0.03%	± 0.09%
100nm	Y	100.3 nm	52	5.11 µm ± 0.03%	± 0.09%

KBSI 한국기초과학지원연구원
KOREA BASIC SCIENCE INSTITUTE

The certified average pitch is derived from the stated certified length that was determined using 10 measurements (taken center-to-center) over the stated number of lines (i.e., length divided by the number of lines minus one). The total expanded uncertainty includes both Type A and Type B uncertainties corrected for sample size using an appropriate Student t-factor.

Equipment used:

Instrument	Model number	Serial #	NIST Certified CD	Resolution	Repeatability
FE-SEM	FEI Verios	9922551	CD-PG01-0211	0.9nm	0.03%

D. S Finch — Certified by

Signature

4/2/2022 — Date

This certificate shall not be reproduced without the permission of AISthesis Products, Inc.
P.O. Box 1950, Clyde, North Carolina 28721 Tel: 828.627.6555 E-mail: CD@aisthesisproducts.com