

KRISS/TR--2021-023

주사전자현미경 배율 교정 측정가이드

Calibration Guide for the Magnification of Scanning Electron
Microscope

2021. 11.

한국표준과학연구원

이 측정가이드는 측정·시험 절차가 없는 신제품(기술)에 대한 신뢰성 제고를 위해 개발되었습니다. 현재까지의 축적된 경험과 과학적 사실에 근거해 해당분야 전문가에 의해 작성되었고 새로운 과학적 타당성이 확인될 경우 언제든지 개정될 수 있습니다.

또한, 이 측정가이드에 기술된 내용은 권고사항으로 법적인 구속력을 갖지 않습니다. 제시된 방법은 최신의 규정과 과학적 근거를 바탕으로 기술한 것으로 추후 관련 규정 개정 및 과학의 발전으로 수정 될 수 있습니다.

이 측정가이드에 대한 의견이나 문의사항이 있을 경우 한국표준과학연구원 중소기업협력그룹으로 연락주시기 바랍니다.

전화번호: (042) 868-5411

측정가이드 제·개정 이력

개정 번호	일 시	개정사유	작 성 자	
			소 속	성 명
0	2021. 11. 01.	최초 제정	한 국 표 준 과 학 연 구 원	김 경 중
최종 제·개정 심의위원			한 국 표 준 과 학 연 구 원	박 병 천
			한 국 표 준 과 학 연 구 원	송 주 현
			(주) 김 스 레 퍼 런 스	우 진 춘
			나 노 종 합 기 술 원	현 문 섭

※ 심의위원 명단은 '가나다' 순서임.

목 차

1. 요약문	1
2. 적용범위	1
3. 인용표준	1
4. 용어의 정의	2
4.1 주사전자현미경	2
4.2 영상 배율	2
4.3 인증표준물질	2
4.4 동작 거리	2
4.5 피치 너비	2
4.6 패턴 너비	2
5. 교정 내용	2
6. 필요장비명세 및 최저 요구 성능	3
7. 준비사항	3
8. 주사전자현미경 배율 교정 방법	5
9. 교정결과의 기록	5
9.1 주사전자현미경 영상 측정	5
9.2 피치너비 측정값 결정	6
9.3 선형 회귀식에 의한 배율 교정	7
9.4 측정불확도 산출	8
10. 교정결과의 작성	10
11 참고문헌	10

주사전자현미경 배율 교정 측정가이드

Calibration Guide for the Magnification of Scanning Electron Microscope

1. 요약문

이 측정 가이드는 주사전자현미경(SEM)의 영상 배율 교정 방법을 제공한다.

최근 수 나노미터에 불과한 선폭, 피치 및 단차를 정확히 측정하는 기술은 반도체 산업에서 가장 중요한 공정 중 하나이다. 그러나 점점 측정 대상의 사이즈가 작아지고, 3차원의 복잡한 구조를 갖음에 따라 계측장비로 측정한 측정값과 실제 값의 차이가 커지고 있다.

전자가 갖는 매우 작은 파장(~0.1 nm)과 높은 분해능을 얻을 수 있는 장점 때문에 전자현미경을 통한 표면의 형상과 크기 측정에 많이 활용되고 있다. 주사전자현미경을 통한 표면 형상 및 크기 등의 측정은 2D 광학계를 이용하며, 초점에 맺힌 영상을 기록하여 축척(정해진 배율)에 따라 그 크기를 가늠하고 있다.

종래에 사용된 배율 교정 방식은 레이저 간섭계를 이용한 방식과 나노 파티클 측정에 의한 방식 등으로 보다 직접적이고 정확한 방법이 요구되었다. 이런 이유로 본 가이드에서는 주사 전자현미경의 배율을 교정하는 새로운 방법을 설명하고자 한다.

2. 적용범위

대상 기술은 종래에 사용하는 저배율용 표준물질로 교정이 어려운 나노미터 영역 측정을 위한 고배율 교정을 위해 새롭게 제안된 방식이다. 이는 최소 3개 이상의 서로 다른 나노 트렌치 구조로 제작된 표준물질을 사용하여 트렌치 구조의 너비를 측정 비교하는 방법으로 현미경의 배율을 교정하는 방법이다.

3. 인용표준

- 3.1 ISO-29301, Microbeam analysis — Analytical transmission electron microscopy — Methods for calibrating image magnification by using reference materials having periodic structures
- 3.2 ISO-20263, Microbeam analysis - Analytical electron microscopy - Method for the determination of interface position in the cross-sectional image of the layered materials
- 3.3 ISO-19749, Nanotechnologies - Measurements of particle size and shape distributions by scanning electron microscopy
- 3.4 KS D ISO 16700, 마이크로빔 분석- 주사전자현미경-영상 배율 교정 지침

4. 용어의 정의

- 4.1 주사전자현미경 (Scanning Electron Microscope) 전자빔을 시료 표면에 주사할 때 발생하는 이차전자를 측정하여 사물의 확대 영상을 얻는 측정기기
- 4.2 영상 배율 (Image magnification) 시편 위에 조사되는 전자빔 주사 영역의 길이에 대응되는 실제 길이의 비율
- 4.3 인증표준물질 (Certified reference materials) 공인된 표준물질 제조기관에서 발급한 인정서와 함께 제공되는 표준물질로 측정 소급성을 통해 인증값이 제공되며, 각각의 인증값은 명시된 신뢰수준에서 불확도가 제공된다.
※ 비고 이 측정 가이드의 목적에 맞도록 표준물질은 영상 배율의 교정에 사용될 수 있도록 최소 3개 이상의 서로 다른 피치 패턴 구조를 가지고 있어야 한다.
- 4.4 동작 거리 (working distance) 시료 표면과 주사전자현미경의 대물렌즈 아랫면 사이의 거리
- 4.5 피치 너비 (pitch width) 나노패턴과 나노트렌치의 쌍으로 이루어진 반복 패턴의 너비
- 4.6 패턴 너비 (pattern width) 단일 나노 패턴의 너비

5. 교정 내용

너비가 다른 일련의 나노 패턴을 가진 인증표준물질의 패턴 너비 인증값(W_{CRM})을 x축에, 주사전자현미경으로 측정한 패턴 너비 측정값($W_{m,CRM}$)을 y축에 도시하면 아래와 같은 선형 회귀식이 구해진다.

$$W_{m,CRM} = b_1 W_{CRM} + b_0 \quad (1)$$

기울기 b_1 은 현미경의 배율을 의미하며 b_0 는 패턴 너비 인증값과 측정값의 차이를 의미한다. 결과적으로 교정된 패턴 너비($W_{m,cal}$)는 측정된 패턴 너비에 배율교정인자를 곱하여 결정된다.

$$W_{m,cal} = \frac{1}{b_1} W_{m,CRM} + b_0/b_1 \quad (2)$$

$$W_{m,cal} = m W_{m,CRM} - c \quad (3)$$

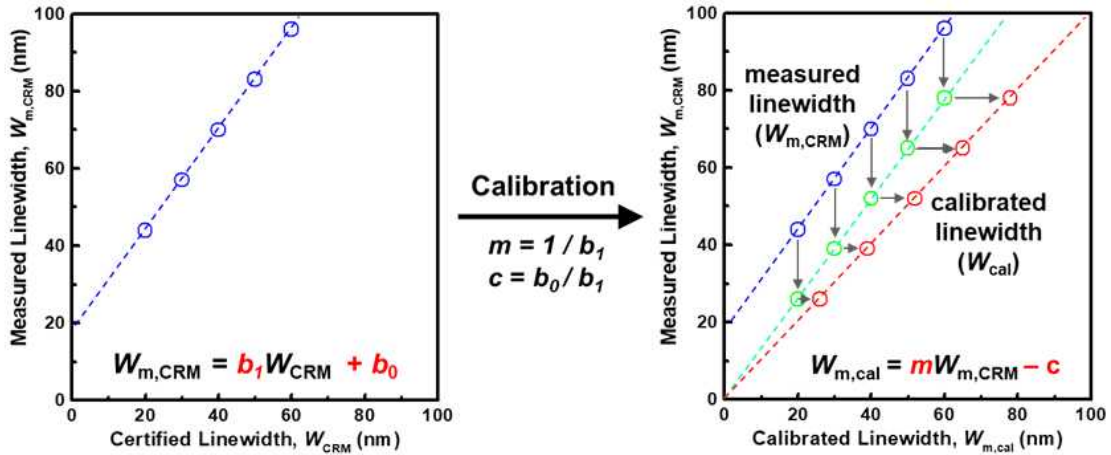


그림 1. 현미경 배율 교정법 개요

6. 필요 장비 명세 및 최저 요구 성능

주사전자현미경은 고분해능 영상 관찰이 가능한 것으로 한국표준과학연구원이 보유하고 있는 FEI Quanta 650 등이 활용될 수 있는데 이 경우 이온총은 전계방출형 전자총이며 전자빔의 가속전압은 30 kV이다. 20 nm에서 60 nm 너비의 나노 패턴을 구분할 수 있도록 20만배 이상의 고분해능 영상이 가능한 주사전자현미경이 요구된다.

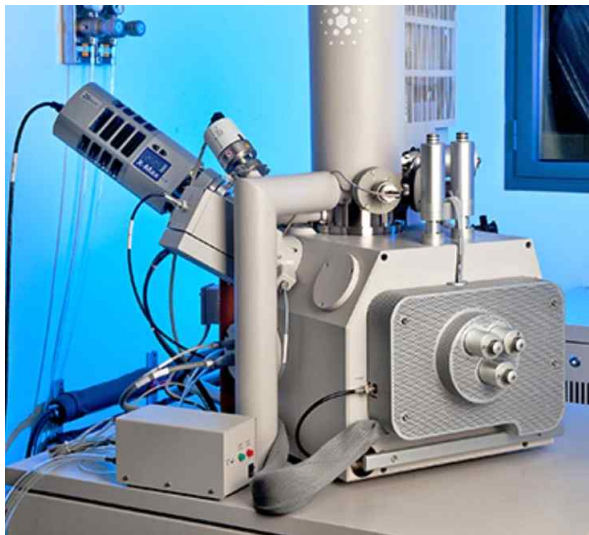


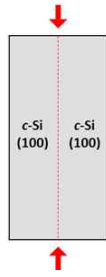
그림 2. 주사전자현미경 FEI Quanta 650

7. 준비사항

인증표준물질 준비

주사전자현미경 배율교정용 인증표준물질은 [그림 3]과 같이 단결정 Si(100) 웨이퍼 사이에 최소 3개 이상의 다중 트렌치 구조를 갖는다. 각 트렌치 구조의 너비는 투과전자현미경 (TEM)으로 5번 반복 측정하여 소급성 있는 인증값을 제공한다. 즉 TEM에서 얻어진 인증값은 인증표준물질의 기관인 단결정 실리콘의 격자상수로부터 자체 소급성을 갖는다.

(a) 인증표준물질 구조



(b) 다중 트렌치 구조 확대 모습

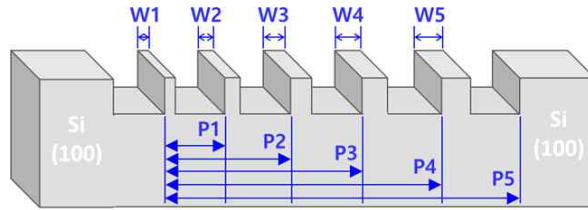


그림 3. 고배율 교정용 인증표준물질과 다중 트렌치 구조 확대 모습

[그림 4]는 고배율 교정용 인증표준물질의 저배율 TEM 영상으로 피치 너비에 대한 인증 방법과 산출된 인증값을 보여주며 [그림 5]는 패턴 너비에 대한 인증 방법과 산출된 인증값을 보여준다.

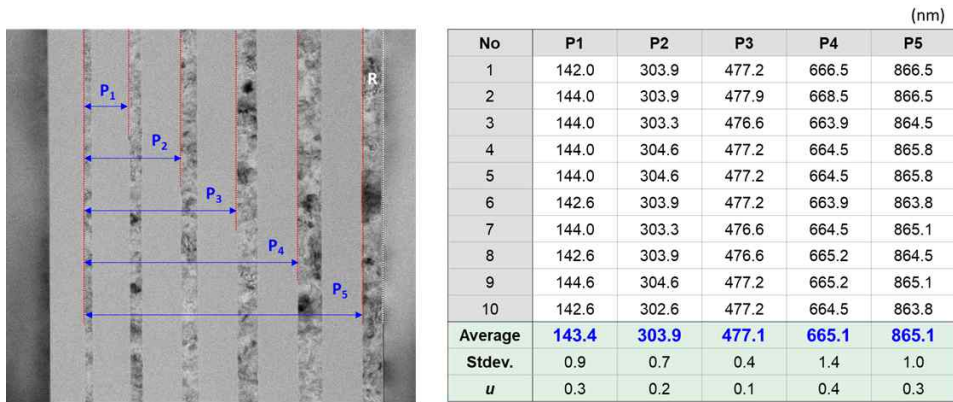


그림 4. 고배율 교정용 인증표준물질의 피치 너비 인증 방법 및 인증값

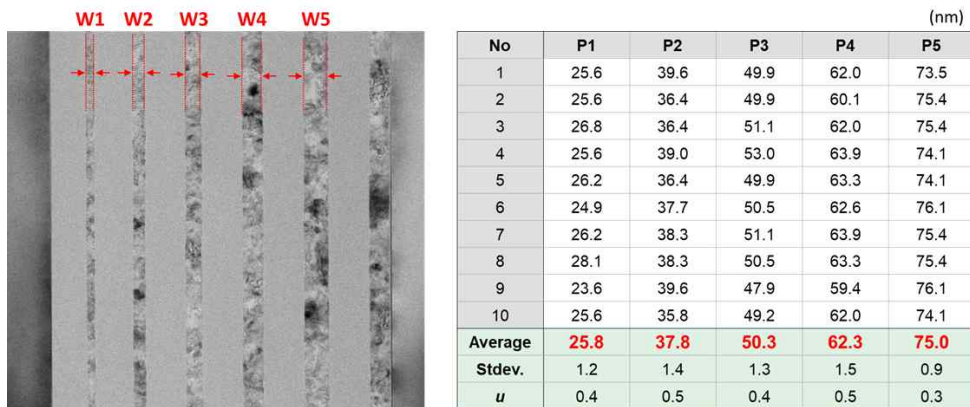


그림 5. 고배율 교정용 인증표준물질의 패턴 너비 인증 방법 및 인증값

8. 주사전자현미경 배율 교정 방법

너비가 다른 일련의 나노 패턴을 가진 인증표준물질을 이용하여 주사전자현미경의 배율을 교정하는 절차는 아래 그림과 같다.

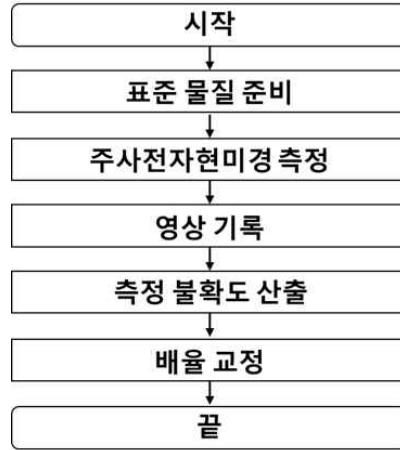


그림 6. 주사전자현미경 배율 교정 방법

9. 교정결과와 기록

9.1 주사전자현미경 영상 측정

배율을 교정하고자 하는 주사전자현미경에 인증표준물질을 장착한다. 시편은 주사전자현미경의 주사 방향에 수직하게 시편을 장착한다. 이는 향후 영상 이미지에서 명암 프로파일로 변환 과정을 용이하게 한다. 각 제조사에서 제공하는 동작거리에 시편을 위치시키고 먼저 저배율에서 시편의 중앙 부분에 다중 트렌치 구조를 찾는다. 다중 트렌치 구조는 [그림 3(b)]와 같이 구성되어 있으며, 다중 트렌치 구조가 한 이미지에 측정되는 고배율을 선택하여 측정한다. 표준물질의 피치 너비를 정확하게 측정하기 위해서는 영상 이미지를 콘투라스트 라인 프로파일로 변환하여야 한다. [그림 7]은 대표적인 SEM 영상이미지(a)와 그로부터 얻어진 콘트라스트 라인 프로파일(b)를 보여준다. 영상 측정 시 초점, 수차, 차징 등으로 인한 이미지 왜곡 현상에 주의 한다. 초점이 맞지 않으면 경계선의 선명도가 떨어지고, 측정된 트렌치의 너비는 커진다.

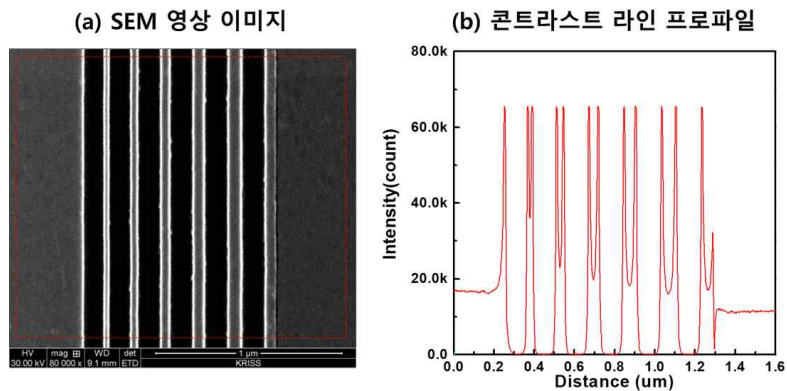


그림 7. SEM 영상 이미지(a)와 이로부터 얻어진 콘트라스트 라인 프로파일

일반적으로 주사전자현미경 영상이미지에서 밝게 빛나는 부분은 이차전자가 많이 발생하는 영역이다. 이 가이드에서는 경계면에서 이차전자가 많이 발생하는 현상을 활용하여 배율 교정을 하는 것이므로, 측정시 트렌치 면과 경계면의 명암차이가 확실하게 나타나도록 측정 조건을 설정한다. 얻어진 영상 이미지 파일은 명암 라인 프로파일로 변환한다. 저배율로 측정하게 되면, [그림 8]과 같이 라인 프로파일 변환시 트렌치 구조가 정확하게 나타나지 않는다.

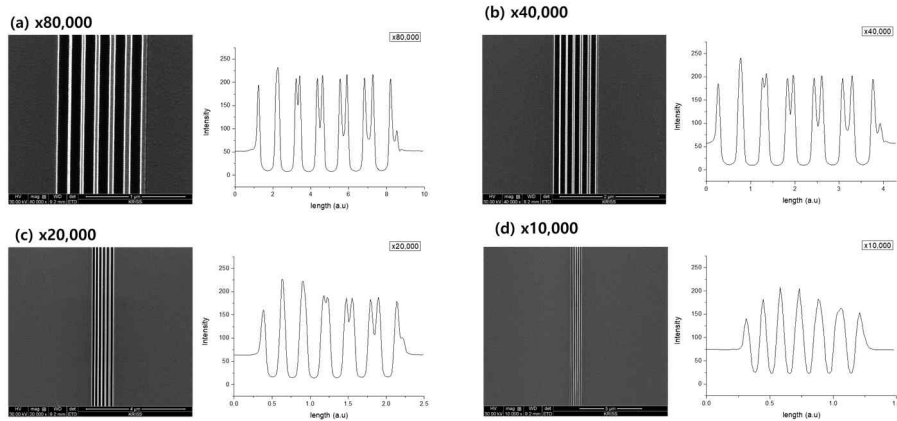


그림 8. 주사전자현미경의 배율에 따른 영상 이미지와 명암 라인 프로파일

9.2 피치너비 측정값 (P_m) 결정

콘트라스트 라인 프로파일에서 배율은 패턴 너비 및 피치 너비로부터 모두 동일하게 교정되지만 본 측정가이드에서는 피치너비를 이용하여 교정하는 것을 기본으로 한다. 즉 [그림 9]에서와 같이 첫 번째 트렌치의 한 모서리를 기준으로 반복되는 피치의 너비를 구조의 길이를 측정하면 다섯 개의 길이가 다른 피치값 (P_1, P_2, P_3, P_4, P_5)을 얻을 수 있고 이를 인증값에 대해 선형피팅하면 그 비율인 기울기(m)로부터 배율을 교정할 수 있다.

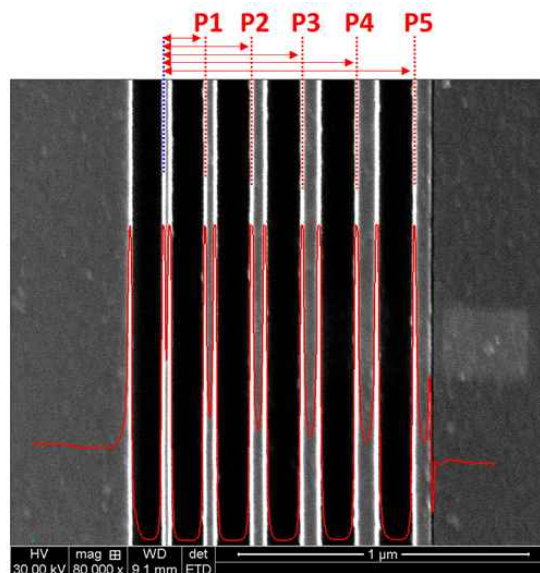


그림 9. 피치 너비 측정 방법

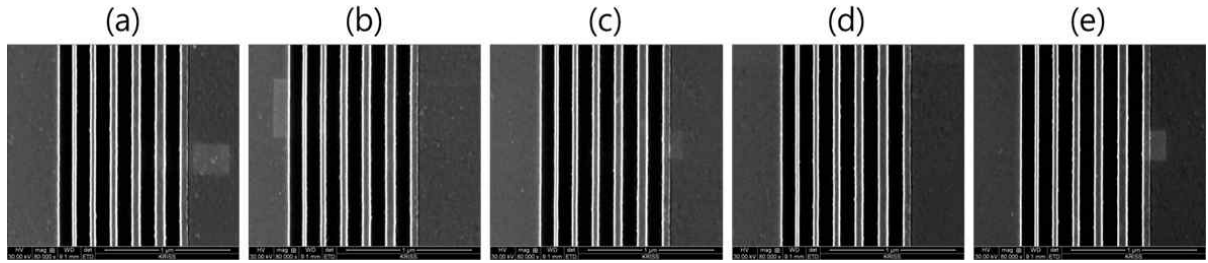


그림 10. 서로 다른 위치에서 얻어진 주사전자현미경 배율교정용 인증표준물질의 나노패턴 영상

[그림 10]은 주사전자현미경 배율교정용 인증표준물질의 나노패턴을 위치가 다른 다섯 군데에서 동일한 배율로 측정된 SEM 영상이다. 또한 [표 1]은 [그림 10]의 5개 SEM 영상을 콘트라스트 라인 프로파일로 변환한 후 [그림 9]에서와 같이 각각의 피크 위치를 결정한 후 5개의 피치 너비를 측정하여 평균한 것으로 피치너비 측정값(P_m)을 보여준다.

표 1. [그림 10]의 5개 SEM 영상으로부터 측정된 피치너비 측정값

No	피치너비 (nm)					평균(P_m) (nm)	표준편차 (nm)	표준불확도 (nm)
	1	2	3	4	5			
P1	143.3	143.6	142.7	143.7	142.7	143.2	0.480	0.2
P2	303.7	305.1	303.7	304.7	302.8	304.0	0.911	0.4
P3	477.4	479.8	477	478.4	476.5	477.8	1.308	0.6
P4	664.9	668.5	665.2	666.2	663.4	665.6	1.888	0.8
P5	865.2	869.4	864.8	866.2	862.5	865.6	2.510	1.1

9.3 선형 회귀식에 의한 배율 교정

[표 2]는 주사전자현미경 배율교정용 인증표준물질의 인증 피치너비와 측정 피치너비를 보여준다. 배율은 인증표준물질에서 제공하는 다중 트렌치 구조의 인증 피치너비(P_{CRM})을 x축으로, 주사전자현미경 영상에서 얻어진 측정 피치너비(P_m)를 y축에 도시한 후 선형 회귀식인 식 (1)을 통하여 계산된다.

$$P_m = mP_{CRM} + c \quad (4)$$

여기서 기울기(m)는 측정된 피치너비와 인증된 피치너비의 비율로 현미경의 배율을 의미하고, 오프셋(c)은 실제 너비가 0에 접근할 때 실제값에서 벗어나는 정도를 의미한다.

[그림 11]은 [표 2]에 주어진 인증 피치너비(P_{CRM})와 측정 피치너비(P_m)를 도시한 것으로 선형 회귀식에 의한 SEM 배율 교정값인 기울기(m)가 그림 내부에 나타나 있다. 피치 너비 측정법에 의한 기울기 1.001은 현 주사전자현미경의 배율이 실제 값에 0.1% 정도만 벗어나 있으며

이는 불확도를 고려할 때 매우 정교하게 교정되어 있음을 보여준다. 또한 예상한 바와 같이 오프셋이 -0.15 nm로 거의 0에 가까운 점은 이러한 방식이 매우 합리적이라는 것을 의미한다.

표 2. 주사전자현미경 배율교정용 인증표준물질의 인증 피치너비와 측정 피치너비

No	인증 피치너비 (nm)		측정 피치너비 (nm)	
	인증값 (P_{CRM})	표준불확도	측정값 (P_m)	표준불확도
P1	143.4	0.3	143.2	0.2
P2	303.9	0.2	304.0	0.4
P3	477.1	0.1	477.8	0.6
P4	665.1	0.4	665.6	0.8
P5	865.1	0.3	865.6	1.1

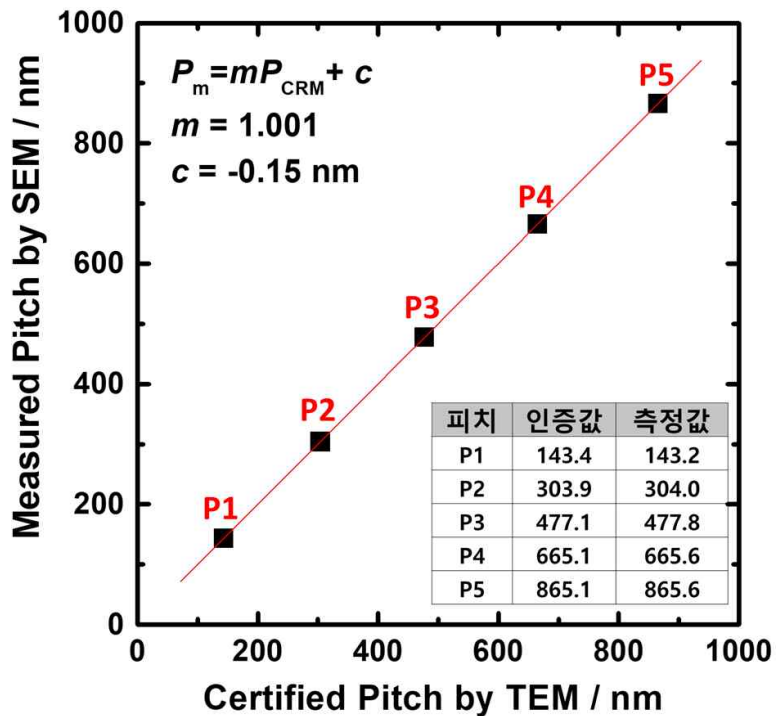


그림 11. 선형 회귀식에 의한 SEM 배율 교정의 예

9.4. 측정불확도 산출

인증표준물질에 의한 현미경 배율 교정의 불확도는 피치너비 인증값 및 그 표준불확도와 피치너비 측정값 및 그 표준불확도의 선형 회귀식으로부터 산출되는 기울기(m)의 불확도로부터 산출된다. 피치너비 인증값(P_{CRM})과 피치너비 측정값(P_m)의 선형 회귀식은 식 (4)로 표현된다.

만일 인증기준 피치 너비값들의 불확도 분산 수준이 회귀식에서 나타난 불확도 수준(s/m 값으로 비교 평가)에 비하여 크게 작은 경우, 교정된 현미경 배율값(기울기, m)의 표준불확도 ($u_1(m)$)는 식 (5)와 같이 나타난다.

$$u_1(m) = s \sqrt{\frac{n}{n \sum_{i=1}^n P_{iCRM}^2 - \left(\sum_{i=1}^n P_{iCRM}\right)^2}} \quad (5)$$

$$\text{여기서, } s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \{P_{im} - (mP_{iCRM} + c)\}^2}{n-2}}.$$

만일 인증기준 피치 너비값들의 불확도 분산 수준이 회귀식에서 나타난 불확도 수준(s/m 값으로 비교 평가)에 비하여 크거나 불확도를 보수적으로 평가하는 경우, 현미경 배율값의 표준불확도($u(m)$)는 식 (6)과 같이 인증기준 피치 너비값들 상대불확도의 평균값을 포함하여 표시한다.

$$\left(\frac{u(m)}{m}\right)^2 = \left(\frac{u_1(m)}{m}\right)^2 + \left\{\overline{\left(\frac{u(P_{iCRM})}{P_{iCRM}}\right)}\right\}^2 \quad (6)$$

여기서, $\overline{\left(\frac{u(P_{iCRM})}{P_{iCRM}}\right)}$ 는 다수의 인증 피치너비 상대표준불확도의 평균값.

실질적으로 수행한 [표 3]과 같은 교정 자료를 바탕으로 측정 배율의 불확도를 계산하는 절차는 다음과 같다.

표 3. 피치 너비 인증값 및 측정값

No	인증 피치너비 (nm)			측정 피치너비 (nm)	
	인증값 (P_{iCRM})	표준불확도 ($u(P_{iCRM})$)	상대 표준불확도	측정값 (P_{im})	개별 표준편차 (s_i)
P1	143.4	0.28	0.0020	143.2	0.48
P2	303.9	0.21	0.0007	304.0	0.91
P3	477.1	0.13	0.0003	477.8	1.31
P4	665.1	0.45	0.0007	665.6	1.89
P5	865.1	0.32	0.0004	865.6	2.51
평균 상대 표준불확도, $\overline{\left(\frac{u(P_{iCRM})}{P_{iCRM}}\right)}$			0.0008		

먼저, 식 (2)에 나타난 표준편차를 계산하면, 다음과 같다.

$$s = 0.2728$$

표준편차 값을 사용하여 회귀식 기울기의 표준불확도는 다음과 같다.

$$u_1(m) = 0.00175$$

기울기의 표준불확도 값을 사용하여 회귀식 기울기의 합성표준불확도는 다음과 같다.

$$u_c(m) = 0.0019$$

불확도에 대한 기준량의 기여도가 크기 때문에 측정량 기울기의 유효자유도(ν_{eff})는 ∞ 로 간주하며, 측정량의 분포를 정규분포로 추정하여 포함인자($k = 1.96$)를 선정한다. 따라서, 95% 신뢰수준의 확장불확도는 다음과 같다.

$$U = k \cdot u_c(m) = 0.0038$$

상기와 같은 계산 결과에 따라서 측정량 배율(m)은 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\text{배율, } m = 1.001 \pm 0.0038 \text{ (95\% 신뢰수준, } k=1.96 \text{)}$$

10. 교정 결과의 작성

교정성적서에 표기하여야 할 사항은 다음과 같다.

- ① 의뢰자(기관명, 주소), 교정성적서 번호(Calibration Report No.)
- ② 교정대상품목(기기명, 제작회사 및 형식, 기기번호)
- ③ 교정일자, 교정성적서 발급일자
- ④ 교정환경(온도 및 습도, 교정장소)
- ⑤ 교정방법 및 절차(측정가이드 번호, 제목)
- ⑥ 교정에 사용된 기준기의 소급성 (사용기기, 제작회사, 기기번호, 불확도)
- ⑦ 교정결과(측정값 및 측정 불확도, 신뢰수준 95 %, 포함인자 포함)
- ⑧ 교정담당자 및 교정책임자 서명
- ⑨ 고객 요청에 따라 필요하다고 인정하는 사항(의사결정 규칙에 따른 적합성 진술)

11. 참고문헌

- [1] G.Y. Kawk, H.C.Chang, M.Y. Na, S.K. Ryu, T.G.Kim, J.C. Woo, K.J. Kim, Calibration of high magnification in the measurement of critical dimension by AFM and SEM, Appl. Surf. Sci. 565(2021), 150481.

주 의

1. 이 보고서는 한국표준과학연구원에서 시행한 주요사업의 연구 보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 한국표준과학연구원에서 시행한 주요사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개 하여서는 안 됩니다.