

현미경의 길이표준 소급성 확립을 위한 배율 교정 시편 인증

김종안*(한국표준과학연구원), 김재완(한국표준과학연구원), 박병천(한국표준과학연구원),
엄태봉(한국표준과학연구원), 강주식(한국표준과학연구원)

Certification of magnification standards for the establishment of meter-traceability in microscopy

J.-A. Kim (Length Group, KRISS), J. W. Kim (Length Group, KRISS), B. C. Park (Length Group, KRISS),
T. B. Eom (Length Group, KRISS), C.-S. Kang (Length Group, KRISS)

ABSTRACT

Microscopy has enabled the development of many advanced technologies, and higher level microscopic techniques are required according to the increase of research in nano-technology and bio-technology fields. Therefore, in many applications, we need to measure the dimension of micro-scale parts accurately, not just to observe their shapes. To establish the meter-traceability in microscopy, gratings have been widely used as a magnification standard. KRISS provides the certification service of magnification standards using an optical diffractometer and a metrological AFM (MAFM). They are based on different measurement principles, and so can give complementary information for each other. In this paper, we describe the configuration of each system and measurement procedures to certificate grating pitch values of magnification standards. Several measurement results are presented, and the discussion about them are also given. Using the optical diffractometer, we can calibrate a grating specimen with uncertainty of less than 50 pm. The MAFM can measure a grating specimen of down to 100 nm pitch value, and the calibrated values usually have uncertainty less than 500 pm.

Key Words : Magnification standard (배율 교정 시편), optical diffractometer (광 회절계), metrological atomic force microscope (길이표준 소급성을 갖는 원자간력 현미경), grating pitch (격자 피치)

1. 서론

현미경 기술의 발전은 생명공학, 반도체공학과 같은 여러 가지 첨단 과학 기술의 탄생과 발전을 가능하게 하였고, 근래 들어 나노 기술 (nanotechnology) 및 바이오 기술 (bio-technology)의 활발한 연구로 인하여 보다 높은 수준의 현미경 기술 개발이 요구되고 있다.¹ 현미경 기술을 이용하여 미소한 형상을 관찰할 뿐만 아니라, 미소 물체의 크기와 형상을 보다 정확하게 그리고 얻어진 측정값이 길이표준 소급성을 갖도록 하기 위하여, 각 국가의 표준기관을 중심으로 현미경을 측정기로써 이용하기 위한 연구가 수행되어 왔다.^{2,3} 그러나 이러한 측정기화 작업을 모든 현미경에 적용하는 것은 비용과 복잡성 면에서 많은 어려움이 존재한다. 따

라서 레이저 간섭계를 이용한 현미경의 직접적인 길이표준 소급성 확립 방법 보다는 교정된 배율 교정 시편을 이용하여 간접적이지만 효율적인 길이표준 소급성 확립 방법을 적용하는 것이 필요하다. 이러한 현미경 배율 교정 작업을 위해서는 시편의 구조적 안정성과 적용이 용이한 1 차원 또는 2 차원 격자 시편이 널리 이용되고 있는데 격자 피치의 크기와 격자 피치 방향의 직교성 (orthogonality)을 이용하여 현미경의 배율과 측정축 간의 직교성을 교정할 수 있다.⁴

우리나라의 표준기관인 한국표준과학연구원 (KRISS)에서는 광 회절계 (optical diffractometer)와 길이표준 소급성을 갖는 원자간력 현미경 (metrological AFM, MAFM)을 이용한 격자 피치 측정 기술을 확보하고 이를 이용한 인증 서비스를 제

공하고 있다. 이와 같은 두 가지 격자 피치 측정 기술은 Table 1 과 같이 서로 다른 특성을 갖기 때문에, 각 측정 방법은 서로 상보적인 역할을 하여 측정 결과의 신뢰성을 크게 증가시킬 수 있다.

본 논문에서는 광 회절계와 MAFM 의 구성을 서술하고, 각 측정기를 이용한 격자 피치 측정 방법과 여러 가지 격자 시편을 인증한 결과를 비교 제시하고 이에 대하여 논의한다.

Table 1 Characteristics of two kinds of certification methods for magnification standards

광 회절계	MAFM
- 광학식 측정	- 탐침식 측정
- 평균피치만 측정가능	- 평균피치, 개별피치, 격자형상 측정 가능
- 높은 측정 반복도	- 낮은 측정 반복도
- 짧은 측정 시간 (≤ 2 분)	- 긴 측정 시간 (≥ 30 분)
- 넓은 시편 면적 요구됨 (≥ 0.5 mm ²)	- 시편 면적 제한 없음

2. 측정 시스템 구성

2.1 광 회절계

광 회절계는 Ar ion 레이저 ($\lambda=488 \text{ nm}$)와 He-Cd ($\lambda=325 \text{ nm}$)를 광원으로 이용한다. 두 개의 거울을 이용하여 입사광이 정밀 회전 원판의 회전면과 평행하고 회전 중심을 지나도록 정렬한다. 시편은 정밀 회전 원판의 중심에 고정되며, 내장된 각도 엔코더 (RPN886, Heidenhain)와 4 분할 포토다이오드를 이용하여 시편에서 발생되는 회절광의 회절각을 정밀하게 측정할 수 있다. 본 광 회절계에서는 입사광과 회절광이 일치할 때의 회절각을 측정하는 Littrow 방식으로 회절계를 구성하였다 (Fig. 1).

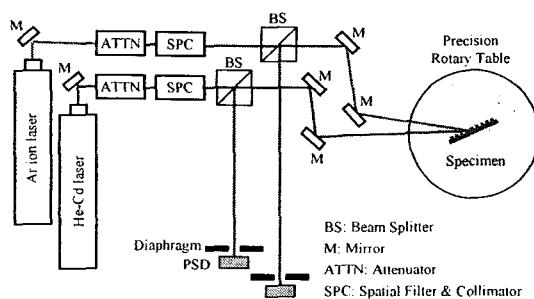


Fig. 1 Schematic diagram of the optical diffractometer using Ar ion and He-Cd laser

이렇게 구성된 광 회절계를 이용하여 격자 시편에서 발생되는 각 차수의 회절각을 측정하고 이를 식 (1)에 대입하면 격자 시편의 피치값을 계산할 수 있다.

$$p = \frac{m\lambda}{2 \cdot \sin\theta_d \cdot \cos\phi_i} \cdot [1 + \alpha \cdot (20 - t)] \quad (1)$$

위 식에서 p 는 격자 피치값, m 은 회절광 차수, λ 는 레이저 파장, θ_d 는 회절각, ϕ_i 는 입사각, α 는 시편 열팽창계수, t 는 시편 온도를 각각 나타낸다. 계산에서 이용되는 회절각은 기구적인 오차요인을 최소화하기 위해 양의 방향과 음의 방향 회절각의 평균값을 이용하며, 빔스플리터면에서 반사된 빔이 4 분할 포토다이오드에 입사되지 않도록 입사각을 0.05 도로 설정하였다. 광 회절계를 이용하면 측정에 사용된 레이저 파장의 1/2 이상의 크기를 갖는 격자 피치까지 측정이 가능하다. 따라서 Ar ion 레이저의 경우에는 250 nm, He-Cd 레이저의 경우에는 170 nm 정도까지의 격자 피치를 측정할 수 있다.

2.2 길이표준 소급성을 갖는 원자간력 현미경

MAFM은 상용 AFM (Autoprobe M5)의 헤드 모듈을 이용하여 구성되었다. 헤드 모듈에 장착된 PZT 투브 형태의 3 축 나노스캐너가 갖는 구동축 간의 커플링된 운동을 제거하고 성능을 향상시키기 위해 이를 탄성 힌지 형태의 증폭과 안내 기구가 적용된 2 축 나노스캐너 (X 축, Y 축)와 1 축 나노스캐너 (Z 축)로 교체하였다. 그리고 헤테로다인 방식의 레이저 간섭계를 이용하여 2 축 나노스캐너의 변위를 1.24 nm의 분해능으로 측정할 수 있도록 하였다 (Fig. 2).

이렇게 구성된 MAFM은 100 μm × 100 μm × 12 μm (X × Y × Z)의 측정 영역을 가지고, 나노스캐너에 내장된 정전 용량형 센서 신호를 이용하여 폐회로 위치 제어를 수행한다. 시편을 2 축 나노스캐너를 이용하여 이동시키면서 Z 축 나노스캐너에 내장된 정전 용량형 센서 신호와 레이저 간섭계를 이용한 2 축 나노스캐너의 위치 측정값을 동기시켜 획득하면 시편의 3 차원 형상 정보를 얻을 수 있고 이로부터 나노미터 영역의 길이 측정이 가능하다.

MAFM의 주요 구성 요소인 레이저 간섭계, 나노스캐너의 성능 평가를 통하여 산정된 MAFM 을 이용한 평면상의 길이 측정 불확도 (u_c)는 $\sqrt{(2.1)^2 + (1.4 \times 10^{-3} \times L)^2} \text{ nm}$ 이다. L 은 X-Y 평면상의 측정 길이를 나타내는 것으로 nm의 단위를 갖는다. 불확도 산정 결과에서 보면 측정 길이에 비례하지 않는 불확도 요인 중에서는 환경 변화로 인한 공기 굴절률 변화와 열팽창에 의한 불확도 요인이 가장

크게 나타난다. 그리고 측정 길이에 비례하는 불확도 요인 중에는 아베 오차로 인하여 측정 불확도가 가장 크게 발생된다.⁵

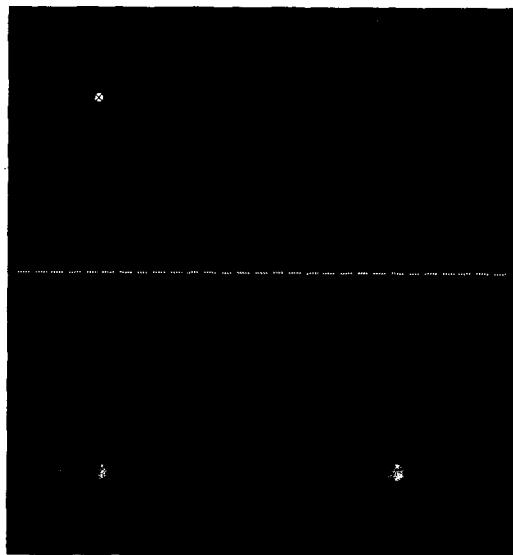


Fig. 2 Schematic view of the main part of metrological atomic force microscope at KRISS

3. 배율 교정 시편 인증

3.1 인증 실험

인증 실험에 사용된 시편은 SEM 배율 교정용 1 차원 격자 시편인 Moxtex 사의 MXS-301CE 과 MXS-701CE이다. 각 시편의 피치 명목값은 288 nm 와 700 nm 이다. 3 mm × 4 mm 크기를 갖는 시편은 0.5 mm 두께의 실리콘 재질로 이루어져 있고 표면은 60 nm 두께의 텅스텐 필름이 덮여 있다.

광 회절계를 이용하여 배율 교정 시편을 인증하기 위해서는 먼저 입사 레이저 광이 정밀 회전 원판의 중심을 통과하고 회전 평면과 평행하도록 두 개의 기울어진 거울을 이용하여 입사 레이저 광을 정렬한다. 입사광 정렬이 완료된 뒤, 시편 면이 정밀 회전 원판의 중심에 위치하도록 시편을 장착한다. 정밀 회전 원판을 이용하여 시편을 회전시키면서 시편에서 발생되는 회절광들이 정밀 회전 원판의 회전 평면과 나란하도록 시편의 회전각과 기울어짐 각을 조절한다. 이러한 정렬 과정들이 완료된 뒤, 시편을 순차적으로 회전시키면서 각 차수의 회절광이 4 분할 포토다이오드의 중심과 일치되는 각도 위치를 측정하고 이를 식 (1)에 대입하여 시편의 평균 피치값을 구할 수 있다.⁶

MAFM 을 이용한 측정을 위해서는, 먼저 피치

방향이 X 축 스캔 방향과 수직하도록 시편의 회전 방향을 정렬한다. 시편의 중심에서부터 0.5 mm 간격으로 균일하게 분포된 3 × 3 패턴 위치에서 100 μm 의 스캔 범위로 시편 면의 이미지를 얻는다. 얻어진 이미지에 peak search 알고리즘을 적용하고 구해진 피크 위치를 이용하여 피치값을 구할 수 있다.⁷

3.2 인증 결과 및 불확도 평가

광 회절계를 이용한 배율 교정 시편 인증 결과 값이 갖는 측정불확도는 측정반복도, 레이저 파장 불확도, 회절각 측정 불확도, 온도 보상 불확도 등으로부터 기인한다. 표 2는 MXS-701CE 의 격자 피치를 측정할 때 발생되는 각 주요 불확도 성분의 크기를 나타낸 것인데, 회절각 측정불확도가 가장 큰 값을 갖고 있음을 알 수 있다. 이러한 회절각 측정불확도는 주로 측정에 이용된 회절 차수간 피치 측정값 변동에 따른 회절각 측정불확도에서 기인한 것이다. 따라서 광 회절계를 이용한 배율 교정 시편 인증 과정에서는 회절 차수간 피치 측정값 변동에 따른 회절각 측정불확도가 가장 큰 측정불확도 요인이 된다.

Table 2 Uncertainty in pitch measurement using the optical diffractometer (MXS-701CE)

주요 불확도 성분	크기 [nm]
피치 측정 반복도	4.3E-3
레이저 파장	3.4E-3
회절각 측정	8.2E-3
온도 보상	3.1E-4
합 계	9.9E-3

MAFM 을 이용하여 측정된 격자 피치값은 피치 측정 반복도, 피치 균일성, MAFM 길이 측정 불확도, 시편 정렬 불확도 등의 불확도 요인을 갖는다. MXS-701CE 시편의 격자 피치 인증값이 갖는 주요 불확도의 성분 별 크기는 표 3과 같다.

여러 가지 불확도 요인 중 MAFM 을 이용한 길이 측정 불확도가 가장 큰 값을 갖는다. 길이 측정 불확도는 측정 길이에 비례하는 항과 비례하지 않는 항으로 나뉘어지는데 측정 길이에 비례하는 항이 격자 피치 측정 불확도에 보다 큰 영향을 준다. 이는 측정 길이에 비례하지 않는 불확도 항은 평균 피치 측정 과정에서는 평균 효과 (averaging effect) 에 의해 그 영향이 감소되지만 측정 길이에 비례하는 항은 그렇지 않기 때문이다.⁸

Table 3 Uncertainty in pitch measurement using the metrological AFM (MXS-701CE)

주요 불확도 성분	크기 [nm]
피치 측정 반복도	5.2E-2
시편상 피치 균일성	6.7E-2
MAFM 길이 측정	1.0E-1
온도 보상	3.1E-4
시편 정렬	8.1E-4
Peak search 알고리즘	3.3E-2
합계	1.4E-1

MAFM 과 광 회절계를 이용한 격자 피치 인증 결과는 Fig. 3 과 같다. 이러한 두 가지 서로 다른 측정 방법을 적용하여 얻은 결과는 수십 pm 이하의 범위 내에서 서로 일치함을 알 수 있다. 그리고 각 피치 인증 값이 갖는 확장 불확도 ($k=2$)를 비교해 보면 광 회절계를 이용한 경우가 10 배 이상 작은 값을 갖는다. MAFM 의 경우에는 광 회절계보다 큰 측정불확도를 가지지만 광 회절계를 이용하여서는 측정 할 수 없는 170 nm 이하의 격자 피치 측정에 이용될 수 있고 개별 피치 및 시편 형상에 대한 정보를 함께 줄 수 있는 장점을 가진다.

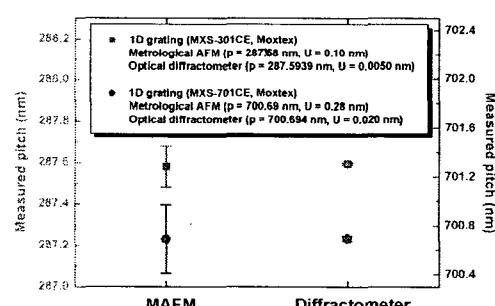


Fig. 3 Comparison between the mean pitch values measured by MAFM and optical diffractometer

4. 결론

본 연구에서는 현미경의 길이표준 소급성을 확립하기 위한 배율 교정 시편의 인증에 대하여 논의하였다. 배율 교정 시편의 피치를 측정할 수 있는 방법인 광 회절계와 MAFM 의 구성 및 측정 방법에 대하여 서술하였다. 288 nm 와 700 nm 의 격자 피치 크기를 갖는 두 종류의 배율 교정 시편을 이용하여 측정 실험을 수행하였다. 광 회절계를 이용하여 측정한 격자 시편 인증값은 0.05 nm, MAFM 을

이용하여 측정된 경우에는 0.5 nm 이하의 확장불확도를 갖고, 두 방법을 이용한 인증 결과는 수십 pm 이하에서 서로 일치하였다. 따라서 광 회절계와 MAFM 는 현미경의 배율 교정 시편의 인증에 있어서 서로 상보적인 정보를 제공할 수 있고 효과적으로 적용될 수 있을 것이다.

후기

본 연구의 일부는 2005년도 한국표준과학연구원 기본사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Diebold, A. C. and Joy, D., "An analysis of techniques and future CD metrology needs," Solid state technology, Vol. 46, No. 7, pp. 63-72, 2003.
- Meli, F. and Thalmann, R., "Long-range AFM Profiler Used for Accurate Pitch Measurements," Meas. Sci. Technol., Vol. 9, pp. 1087-1092, 1998.
- Höller-Grohne, W. and Bosse, H., "An electron optical metrology system for pattern placement measurements," Meas. Sci. Technol., Vol. 9, pp. 1120-1128, 1998.
- Nakayama, Y., Okazaki, S. and Sugimoto, A., "Proposal for a new submicron dimension reference for an e-beam metrology system," Journal of Vacuum Science and Technology, Vol. B6, pp. 1930-1933, 1988.
- Kim, J. A., Kim, J. W., Park, B. C., Eom, T. B. and Hong, J. W., "Development of a metrological atomic force microscope for the length measurements of nanometer range," Journal of Korean Society of Precision Engineering, Vol. 21, No. 11, pp. 75-82, 2004.
- Kim, J. A., Won, Y. S. and Park, B. C., "Precision laser Diffractometer for Two-dimensional Grating Pitch Measurement," Proceedings of Korea-Japan Joint Symposium on Nanoengineering (NANO 2003), pp. 336-339, 2003.
- Kim, J. A., Kim, J. W., Park, B. C., Eom, T. B. and Kang, C. S., "Pitch measurement of one-dimensional gratings using a metrological atomic force microscope and its uncertainty analysis," Journal of Korean Society of Precision Engineering, Vol. 22, No. 4, pp. 84-91, 2005.