

미터 소급성을 갖는 원자간력 현미경을 이용한 1차원 격자 피치 측정과 불확도 평가

김종안[#], 김재완^{*}, 박병천^{*}, 엄태봉^{*}, 강주식^{*}

Pitch Measurement of One-dimensional Gratings Using a Metrological Atomic Force Microscope and Uncertainty Evaluation

Jong-Ahn Kim[#], Jae Wan Kim^{*}, Byong Chon Park^{*}, Tae Bong Eom^{*}, Chu-Shik Kang^{*}

ABSTRACT

We measured the pitch of one-dimensional (1D) grating specimens using a metrological atomic force microscope (M-AFM). The 1D grating specimens are often used as a magnification standard in nano-metrology, such as scanning probe microscopy (SPM) and scanning electron microscopy (SEM). Thus, we need to certify the pitch of grating specimens for the meter-traceability in nano-metrology. To this end, an M-AFM was setup at KRISS. The M-AFM consists of a commercial AFM head module, a two-axis flexure hinge type nanoscanner with built-in capacitive sensors, and a two-axis heterodyne interferometer to establish the meter-traceability directly. Two kinds of 1D grating specimens, each with the nominal pitch of 288 nm and 700 nm, were measured. The uncertainty in pitch measurement was evaluated according to Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. The pitch was calculated from 9 line scan profiles obtained at different positions with 100 μm scan range. The expanded uncertainties ($k = 2$) in pitch measurement were 0.10 nm and 0.30 nm for the specimens with the nominal pitch of 288 nm and 700 nm. The measured pitch values were compared with those obtained using an optical diffractometer, and agreed within the range of the expanded uncertainty of pitch measurement. We also discussed the effect of averaging in the measurement of mean pitch using M-AFM and main components of uncertainty.

Key Words : Metrological atomic force microscope (미터 소급성을 갖는 원자간력 현미경), Nanometrology (나노메트롤로지), 1D grating (1차원 격자), Mean pitch (평균 피치), Uncertainty analysis (불확도 해석)

1. 서론

근래 들어 나노테크놀러지 및 반도체 산업과 관

련된 기술이 발전함에 따라 여러 가지 임계 치수 (critical dimension) 측정과 sub- μm 의 크기를 갖는 미소한 물체를 관찰하고 측정하기 위한 현미경 기술

접수일: 2004년 10월 12일; 게재승인일: 2005년 1월 21일

교신저자: 한국표준과학연구원 광기술표준부 길이그룹
E-mail jakim@kriss.re.kr Tel. (042) 868-5683

* 한국표준과학연구원 광기술표준부 길이그룹

(microscopic technology)의 중요성이 크게 증가되고 있다.^{1,2} SEM, TEM, SPM 등이 이러한 분야에서 사용되는 대표적인 현미경 기술인데 SEM이나 SPM을 이용하여 정확한 형상 및 길이 측정을 하기 위해서는 정밀한 배율 교정이 필요하고 이를 위해 1차원 격자 시편이 배율 교정 시편으로 널리 사용되고 있다.^{3,4} 따라서 격자 시편의 피치값을 미터소급성 (meter-traceability)을 갖고 인증할 수 있는 기술의 개발이 중요하다.

격자 시편의 피치값은 광 회절계 (optical diffractometer), M-AFM 등을 이용하여 측정할 수 있다. SEM이나 TEM으로도 피치값을 측정할 수 있지만 이를 위해서는 인증된 배율 교정 시편을 이용한 배율 교정 작업이 선행되어야 한다. 광 회절계를 이용한 피치 측정 방법은 매우 높은 측정 정밀도를 가지고 있지만 평균 피치값만을 측정할 수 있다.^{5,6} 그러나 M-AFM을 이용한 피치 측정 방법은 평균 피치값과 함께 개별 피치값과 시편 표면의 프로파일 정보를 함께 얻을 수 있는 장점을 가진다.^{7,8} 따라서 이 두 가지 측정 방법은 격자 시편의 피치 측정에 상호 보완적으로 적용될 수 있다.

M-AFM을 이용하여 미터소급성을 갖는 피치값을 측정하기 위해서 레이저 간섭계를 이용하여 시편이 고정된 나노스캐너의 변위를 직접 측정^{7-10,12}하거나 레이저 간섭계를 이용하여 교정된 정밀 변위 센서¹¹를 이용한다. 각 축방향 운동간의 커플링 (coupling) 문제를 해결하기 위해서는 각 구동축을 분리하거나 커플링이 최소화되도록 나노스캐너를 설계한다.⁷⁻¹² 또한 나노스캐너의 구동에 사용되는 PZT의 비선형성을 제거하기 위해 외부 변위 센서를 이용한 피드백 제어를 적용하는데 이를 위해 변위 측정에 사용되는 레이저 간섭계 신호를 직접 이용⁸⁻¹⁰하거나 정전 용량형 센서를 이용^{7,11,12}하여 폐회로 제어 루프를 구성한다.

M-AFM을 이용한 격자 시편의 피치 측정에 관한 연구는 주요 선진국의 표준연구기관을 중심으로 수행되고 있다. 각 연구기관의 M-AFM 개발과 이를 이용한 나노미터 영역의 길이 측정 결과가 발표되었다.⁷⁻¹² 본 연구에서는 격자 피치 측정에서 나타나는 불확도 요인을 체계적으로 규명하고 평균화 효과 (averaging effect)가 피치 측정불확도에 미치는 영향을 새롭게 제시한다.

본 논문에서는 KRISS에서 개발된 M-AFM의 구성과 이를 이용한 피치 측정 방법을 제시하고 측정

불확도 표현 지침에 따라 측정불확도를 평가한다.¹³ 1차원 격자 시편의 피치를 측정하여 측정 결과와 함께 각 표준불확도 성분 및 확장불확도값을 제시한다. 광 회절계를 이용한 피치 측정 결과와의 비교를 통하여 M-AFM을 이용한 피치값 인증 방법의 타당성을 검증한다.

2. 피치 측정

2.1 미터 소급성을 갖는 원자간력 현미경

1차원 격자 피치 측정에 사용된 M-AFM은 상용 AFM (Autoprobe M5, ThermoMicroscope)의 헤드 모듈을 이용하여 구성되었다. 헤드 모듈에 장착된 PZT 튜브 형태의 3축 나노스캐너가 갖는 구동축간의 커플링된 운동을 분리하기 위해 PZT 튜브의 Z축만을 탐침의 구동을 위해 사용하고 100 μm \times 100 μm 영역의 X-Y 평면 스캐닝은 탄성 힌지 형태의 증폭과 안내 기구가 적용된 나노스캐너를 이용하여 이루어진다. 그리고 헤테로다인 방식의 레이저 간섭계를 이용하여 나노스캐너의 변위를 1.24 nm의 분해능으로 측정할 수 있도록 구성하였다 (Fig. 1).

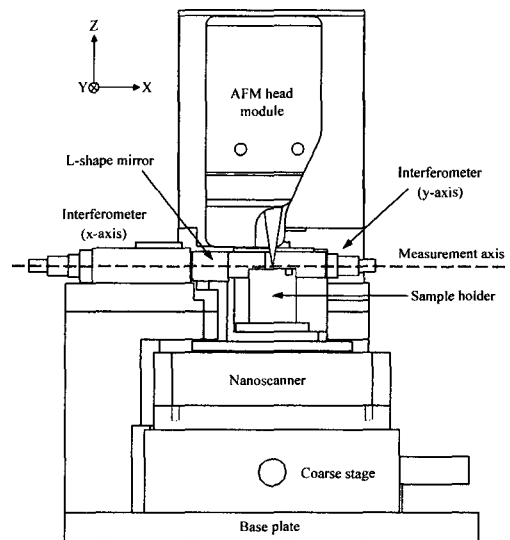


Fig. 1 Schematic diagram of metrological AFM at KRISS

레이저 간섭계의 dead path 오차를 감소시키기 위해 L형 거울면과 간섭계 모듈 사이의 거리가 최

소화될 수 있도록 하였다. 그리고 시편 면의 측정 위치를 레이저 간섭계 광축의 중심과 최대한 일치시켜 아베 오차의 영향을 최소화시킬 수 있도록 하였다.

나노스캐너의 폐회로 위치 제어는 나노스캐너에 내장된 정전 용량형 센서의 신호를 이용하여 이루어진다. 위치 제어기는 아날로그 형태의 P-I 제어기와 Autoprobe M5에 내장된 디지털 형태의 제어기가 복합적으로 적용될 수 있도록 구성되었다. 따라서 나노스캐너를 구동하면서 Z축 방향의 PZT 입력 전압값과 레이저 간섭계를 이용하여 측정되는 나노스캐너 위치 측정값을 동기시켜 획득하면 측정면의 3차원 형상 정보를 얻을 수 있고 이로부터 나노 길이 측정이 가능하다.

측정불확도 표현 지침을 따라 산정된 M-AFM을 이용한 길이 측정값의 확장불확도 ($k = 2$)는 $\sqrt{(4.3)^2 + (2.8 \times 10^{-4} \times L)^2}$ 와 같이 표현된다. L 은 측정 길이이고 nm의 단위를 갖는다. 측정불확도 요인은 크게 레이저 간섭계 오차, 기하학적 오차, 그리고 환경적인 오차 요인으로 구분된다. 이러한 오차 요인 중 레이저 간섭계 출력값의 드리프트가 가장 큰 오차 요인데 이는 공기의 굴절률 변화와 M-AFM 구성 요소의 열안정성에서 기인하는 것으로 추론된다. 측정 길이의 크기에 비례하는 불확도 요인으로는 아베 오차가 가장 큰 값을 갖는다.¹²

2.2 피치 측정 방법

M-AFM을 이용하여 격자 시편의 피치값을 측정하기 위해서는 격자 시편 표면의 형상을 직선 또는 평면 영역에서 취하고 이를 해석하여 격자 시편의 피치값을 나타내는 평균 피치값을 계산한다. 본 논문에서는 X축 방향의 라인 스캔 (line scan)으로부터 격자 형상을 측정하는 경우에 대하여 설명한다. 평면 영역에서 얻어진 형상 정보를 이용하는 경우에도 이를 동일하게 확장 적용할 수 있다.

직선 형태의 라인 스캔으로부터 Fig. 2와 같은 격자 시편의 형상 프로파일 (profile)을 얻을 수 있고 이를 이용하여 피치값을 계산하기 위해서는 다음과 같은 데이터 전 처리과정이 적용되어야 한다.

먼저 측정 시편의 기울어짐 각(θ)을 보정하기 위하여 Fig. 2와 같이 얻어진 형상 프로파일에서 피크 (peak)와 밸리 (valley) 위치를 찾고 이들의 위치들을 이용한 직선 맞춤을 통하여 측정 시편의 기울

어짐 각을 보정하고 중심선 (center line)의 위치를 결정한다. 기울어짐 각이 보정된 형상 프로파일로부터 무게 중심 (center of gravity) 방법과 영점 교차 (zero-crossing) 방법을 이용하여 각 봉우리의 피크 위치를 결정한다 (Fig. 3).

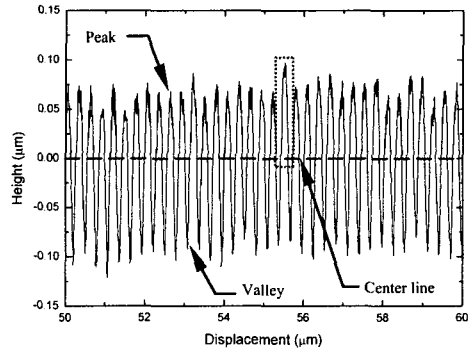


Fig. 2 Profile of the surface of 1D grating specimen

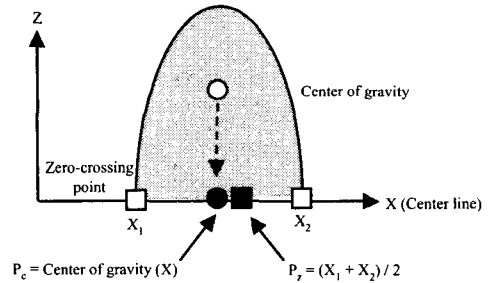


Fig. 3 Determination of peak position using the center of gravity method and the zero-crossing method

무게 중심 방법에서는 중심선과 봉우리의 프로파일로 둘러싸인 부분의 무게 중심의 X축 좌표값을 피크 위치 P_c 로 설정한다. 영점 교차 방법에서는 중심선과 봉우리의 프로파일이 교차하는 두 점의 중점을 피크 위치 P_z 로 설정한다. 이 때 프로파일에 존재하는 측정 잡음의 영향을 최소화하기 위해 교차점 주위의 점들을 이용하여 직선 맞춤을 적용한다. 이렇게 구해진 직선과 중심선의 교점을 영점 교차점으로 결정한다. 이상적인 프로파일 형상의 경우에는 두 가지 방법으로 구해진 피크 위치가 일

치하지만 형상의 비대칭성, 측정 잡음 등의 오차 요인으로 인하여 일반적으로 두 값은 일치하지 않게 된다. 따라서 이로 인하여 발생하는 피치 측정 오차를 측정불확도 요인으로 고려해 주어야 한다.

이렇게 구해진 연속된 피크 위치들 간의 거리로부터 각 개별 피치값을 계산할 수 있다. 그러나 시편의 피치 방향이 주 스캔 방향인 X축과 수직하지 않을 경우에는 피치 측정값에 코사인 오차 (cosine error)가 발생된다. 따라서 이러한 측정 오차를 보상하기 위하여 시편의 회전각 (θ_z)을 구한다. 이를 위해 Y축 방향으로 동일한 간격을 갖는 복수의 프로파일을 측정된 뒤, 각 프로파일에서 피크 위치들을 구한다. 그리고 동일한 피치 라인에 해당되는 피크 위치들을 직선 맞춤해서 구해진 직선과 Y축이 이루는 각을 시편의 회전각으로 설정한다.⁸

2.3 피치값 계산

앞에서 설명한 측정 방법을 이용하여 1차원 격자 시편의 피치값 p 는 식 (1)과 같이 계산된다. p_i 는 i 번째 라인 스캔 프로파일로부터 구해진 평균 피치값을 나타내고 M 은 격자 시편의 피치값 계산에 사용된 라인 스캔 프로파일의 개수이다.

$$p = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M p_i \quad (1)$$

각 라인 스캔 프로파일에서 얻어진 평균 피치값 p_i 는 식 (2)와 같이 개별 피치값 p_{ij} 의 평균값에 시편의 기울어짐과 회전각 보상항 C_s 와 온도 보상항 C_t 을 곱한 것으로 표현된다. 또한 이는 개별 피치값의 합인 라인 스캔 프로파일 상의 첫번째 피크 위치와 마지막 피크 위치 사이의 거리인 L_i 를 이용하여 표현될 수도 있다. N 은 각 라인 스캔 프로파일에 포함된 개별 피치의 개수를 나타내고 각 프로파일은 동일한 개수의 개별 피치를 포함한다고 가정한다.

$$p_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N p_{ij} C_s C_t = \frac{L_i}{N} C_s C_t \quad (2)$$

이 때 C_s 와 C_t 는 각각 식 (3), (4)와 같이 표현된다. a_m 은 격자 시편 재료의 열팽창계수, T 는 시편의 온도를 나타낸다.

$$C_s = \frac{\cos \theta_z}{\cos \theta_y} \quad (3)$$

$$C_t = 1 + \alpha_m (T - 20) \quad (4)$$

식 (1)~(4)를 정리하면 격자 시편의 피치값은 식 (5)와 같이 구해진다.

$$p = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M L_i \frac{\cos \theta_z}{\cos \theta_y} [1 + \alpha_m (T - 20)] \quad (5)$$

3. 피치 측정 불확도

본 장에서는 측정불확도 표현 지침을 이용하여 격자 피치 측정의 불확도를 평가한다. 격자 피치값의 불확도 $u(p)$ 는 식 (6)과 같이 i 번째 라인 스캔 프로파일로부터 계산된 평균 피치값의 불확도 $u(p_i)$, 시편상의 측정 위치에 따른 피치 측정값의 불균일성으로 인한 불확도 성분 $u(p_u)$, 피치 측정의 반복성으로 인한 불확도 성분 $u(p_r)$ 을 이용하여 표현된다.

$$u(p) = \sqrt{u^2(p_i) + u^2(p_u) + u^2(p_r)} \quad (6)$$

불확도 $u(p_i)$ 는 식 (2)에 불확도전파법칙을 적용하여 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$u^2(p_i) = \left(\frac{C_s C_t}{N}\right)^2 u^2(L_{mi}) + \left(\frac{C_s C_t}{N}\right)^2 u^2(L_{pi}) + \left(\frac{L_i C_t}{N}\right)^2 u^2(C_s) + \left(\frac{L_i C_s}{N}\right)^2 u^2(C_t) \quad (7)$$

위 식에서 $u(L_{mi})$ 는 M-AFM을 이용한 L_i 의 길이 측정불확도 성분, $u(L_{pi})$ 는 피크 위치 계산 방법에 따른 길이 측정불확도 성분을 나타내고 $u(C_s)$ 와 $u(C_t)$ 는 시편의 기울어짐과 회전각의 보상항과 시편 온도 보상항의 불확도 성분을 각각 나타낸다.

그런데 $u(L_{mi})$ 는 식 (8)과 같이 측정 길이에 비례하지 않는 항 $u(L_{np})$ 과 측정 길이에 비례하는 항 $u(L_{pr})$ 로 구분하여 나타낼 수 있다.¹²

$$u(L_{mi}) = \sqrt{u^2(L_{np}) + u^2(L_{pr}) \cdot L_i^2} \quad (8)$$

식 (2)와 (8)을 식 (7)에 대입하여 정리하면 $u(p_i)$ 는 식 (9)와 같이 표현된다.

$$u^2(p_i) = \left(\frac{C_s C_t}{N}\right)^2 u^2(L_{np}) + \left(\frac{C_s C_t}{N}\right)^2 u^2(L_{pi}) + \left[u^2(L_{pr}) + \frac{u^2(C_s)}{C_s^2} + \frac{u^2(C_t)}{C_t^2} \right] \cdot p_i^2 \quad (9)$$

식 (9)에서 보면 $u(p_i)$ 를 구성하는 합성표준불확도 성분값 중 피치 크기에 비례하지 않는 항은 N 이 증가됨에 따라, 즉 한 라인 스캔의 길이가 증가됨에 따라 이에 비례하여 감소됨을 알 수 있다. 따라서 M-AFM을 이용한 길이 측정불확도 성분 중 측정 길이에 비례하지 않는 간섭계의 비선형성, 열변형으로 인한 불확도 성분과 피크 위치의 결정 과정에서 발생하는 불확도 성분의 영향은 스캔 라인의 길이를 증가시킴으로써 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

4. 피치 측정 실험

4.1 실험 방법 및 결과

1차원 격자 피치 측정 실험에 사용된 시편은 SEM 배율 교정용 시편인 Moxtex사의 MXS-301CE, MXS-701CE이다. 각 격자 시편 피치의 명목값은 288 nm와 700 nm이고 피치값의 정확도는 $\pm 3\%$ 이다. 이러한 피치값의 정확도는 실제 격자 시편 피치값과 명목값의 차이로 피치 측정 실험에서는 문제가 되지 않는다. 3 mm \times 4 mm 크기를 갖는 시편은 0.5 mm 두께의 실리콘 재질로 이루어져 있다. 특정한 파장을 갖는 레이저의 간섭 무늬를 이용한 리소그래피 방법으로 형성된 주기적인 형상은 100 nm 이상의 깊이를 갖고 표면은 60 nm 두께의 텅스텐 필름이 덮여 있다.

시편의 회전각을 계산하기 위하여 Y축 방향으로 10 μ m 간격으로 11개의 라인 스캔 프로파일을 측정한다. 격자 시편의 피치값을 얻기 위해서는 Fig. 4와 같이 시편면에 균일하게 분포된 9개의 위치에서 X축 방향의 직선 형태 스캐닝을 통하여 격자 시편의 형상을 측정하고 이로부터 얻어진 9개의 라인 스캔 프로파일에서 계산된 평균 피치값들을 이용하여 시편의 피치값을 결정한다.

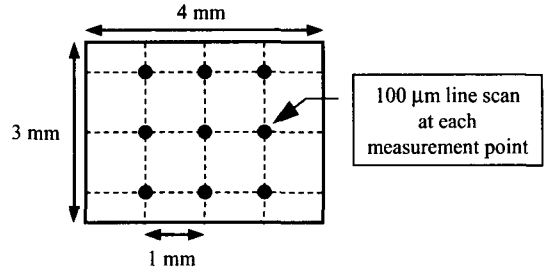


Fig. 4 Schematic drawing of measurement points on a specimen surface

그리고 이 때 각 라인 스캔 프로파일에서 얻어진 평균 피치값들의 표준 편차를 시편상의 측정 위치에 따른 피치 측정값의 불균일성에서 기인하는 불확도 성분으로 설정한다. 또한 동일한 위치에서 10번의 라인 스캔 프로파일을 측정하고 각 프로파일을 이용하여 계산된 평균 피치값들의 표준 편차를 M-AFM의 피치 측정 반복성에서 기인한 불확도 성분으로 설정한다. 각 형상 측정 시의 스캐닝 범위는 100 μ m, 속도는 0.02 Hz, 그리고 데이터 기록 주기는 1 ms로 설정하였다.

Fig. 5는 각 격자 시편의 측정 위치에 따른 피치값 변화를 나타내고 Fig. 6은 시편상의 임의의 위치에서 10회 반복한 피치 측정 결과이다.

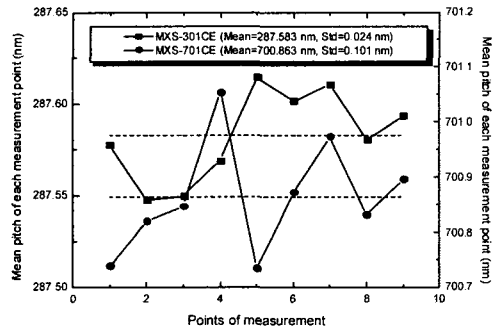


Fig. 5 Results of mean pitch measurements at each measurement point

측정 결과에서 보면 MXS-301CE에 비해 MXS-701CE의 경우에 시편 상의 측정 위치에 따른 측정값 변화가 더 크게 나타남을 알 수 있다. 이러한 측정 결과는 두 시편의 개별 피치 균일성 차이

와 함께 각 라인 스캔 프로파일의 평균 피치값 계산과정에 사용된 개별 피치 개수의 차이에서 기인한다.

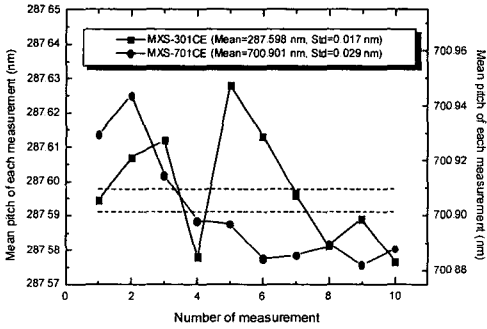


Fig. 6 Repeatability of mean pitch measurements

두 시편의 측정 시에 동일한 크기의 라인 스캔 범위를 이용하였기 때문에 각 라인 스캔의 평균 피치값 계산에 이용되는 개별 피치 개수는 각각 342개와 138개로 2.5배 정도 차이가 난다. 따라서 MXS-301CE 경우가 MXS-701CE 경우에 비해 평균화 효과가 더 크게 나타나고 측정 위치에 따른 평균 피치 측정값의 변화가 더 작게 나타난다. 피치 측정 반복성을 평가한 경우에도 MXS-701CE 경우

가 더 큰 표준 편차값을 갖는다.

4.2 불확도 평가

측정된 격자 시편 피치값의 측정불확도는 Table 1과 정리할 수 있다. 피치 측정 불균일성으로 인한 불확도는 시편상의 측정 위치에 따른 피치 측정값의 표준 편차로부터 구해진다. 피치 측정 반복성으로 인한 불확도는 동일 위치에서 반복 측정한 결과의 표준 편차값으로 설정된다. 길이 측정 불확도 성분 값들은 측정에 사용된 M-AFM의 길이 측정 불확도 값¹²을 이용하였고 수식의 형태로 표현된 불확도를 측정 길이에 비례하지 않는 항과 비례하는 항으로 구분하여 적용하였다. 시편 온도 보상에 사용된 온도 측정과 열팽창 계수의 불확도는 직사각형 형태의 B형 분포를 가진다고 가정하였다.

시편 기울어짐 각의 표준불확도값은 각 라인 스캔 프로파일의 기울어짐 각들의 최대 편차값을 이용하여 산정하였다. 시편 회전각의 경우에도 이와 마찬가지로 각 피치 라인을 이용하여 구한 회전각의 최대 편차값을 이용하여 표준불확도값을 계산하였다. 피크 위치 결정 방법에 따른 표준불확도값은 두 알고리즘을 적용하여 계산된 L_i 의 최대 편차값을 이용하여 결정하였다. 확장불확도의 포함인자값은 표준불확도값 산정 과정의 자유도가 충분히 크

Table 1 Uncertainty in 1D pitch measurements using M-AFM

분류	불확도 원인 및 표준불확도 성분, u	표준불확도값, u	합성표준불확도 성분값, $u_i = c_i u$ (nm)
피치 측정	피치 측정 불균일성, $u(p_u)$	$2.408E-2 / 1.007E-1$ nm*	$2.408E-2 / 1.007E-1$
	피치 측정 반복성, $u(p_r)$	$1.729E-2 / 2.914E-2$ nm	$1.729E-2 / 2.914E-2$
길이 측정불확도	측정 길이에 비례하지 않는 항, $u(L_{np})$	2.131 nm	$6.232E-3 / 1.567E-2$
	측정 길이에 비례하는 항, $u(L_{pr})$	$1.428E-4$	$1.428E-4 \times p^{**}$
시편 온도	온도 측정, $u(T)$	0.3 K	$4.500E-7 \times p$
	열팽창 계수, $u(\alpha_m)$	$2.6E-5$ 1/K	$1.801E-5 \times p / 9.007E-6 \times p$
기울어짐 및 회전각 보정	시편의 기울어짐 각, $u(\theta_y)$	$1.077 / 1.337$ arcsec	$1.708E-11 \times p / 1.347E-10 \times p$
	시편의 회전각, $u(\theta_z)$	$1.902E-1 / 1.550E-2$ arcdeg	$1.073E-5 \times p / 2.320E-6 \times p$
피크 위치 결정 방법	피크 위치 결정 방법간의 차, $u(L_{pi})$	$4.567 / 5.922$ nm	$7.710E-3 / 2.514E-2$
MXS-301CE ($p = 288$ nm)	합성표준불확도	$u_c^2 = (3.1E-2)^2 + (1.4E-4 \times p)^2$ (nm)	
	확장불확도 ($k = 2$)	0.10 nm	
MXS-701CE ($p = 700$ nm)	합성표준불확도	$u_c^2 = (1.1E-1)^2 + (1.4E-4 \times p)^2$ (nm)	
	확장불확도 ($k = 2$)	0.30 nm	

*MXS-301CE / MXS-701CE

** p 는 시편의 명목 피치값 (nm)

다고 판단되어 이와 같이 결정하였다.

Fig. 7은 각 불확도 요인의 합성표준불확도 성분값을 나타낸 것이다. 여러 가지 불확도 요인 중 시편상의 측정 위치에 따른 피치 측정값의 불균일성 $u(p_u)$ 과 M-AFM을 이용한 길이 측정 불확도 성분 중 측정 길이에 비례하는 불확도 성분 $u(L_{pr})$ 이 큰 부분을 차지한다.

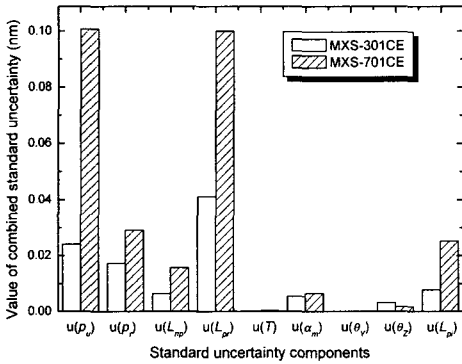


Fig. 7 Comparison of the magnitude of each uncertainty component

측정 위치에 따른 피치 측정값의 변화는 주로 시편의 불균일성으로부터 기인하고 평균 피치값을 계산할 때 이용되는 피치의 개수를 증가시킴으로써 이를 감소시킬 수 있다. 그런데 일반적인 1차원 격자 시편의 경우 피치값의 불균일성이 피치 방향 보다는 피치의 수직 방향으로 크게 나타난다. 따라서 측정 시 피치의 개수를 증가시키기 위해서 2차원적인 스캔 영역을 설정하여 피치 방향으로 측정 영역을 증가시키는 것 보다는 피치의 수직 방향으로 스캔 영역을 증가시키는 것과 시편 상의 피치 측정 위치를 증가시키는 것이 보다 효과적일 것이다.

3장에서 설명한 것과 같이 M-AFM을 이용한 길이 측정 불확도 성분 중 측정 길이에 비례하지 않는 성분은 한 라인 스캔 프로파일에 포함된 피치의 개수로 나뉘어져 격자 시편의 평균 피치 측정 불확도 성분으로 나타난다. 그러나 측정 길이에 비례하는 길이 측정 불확도 성분은 피치 측정 불확도에 그대로 적용되기 때문에 보다 주요한 불확도 요인이 된다. 따라서 M-AFM의 측정 길이에 비례하는 불확

도 성분 중 가장 큰 값을 갖는 아베 오차를 줄이기 위하여 기생 회전 운동을 최소화하기 위한 나노스캐너의 설계와 아베 오프셋을 감소시키기 위한 정밀한 정렬 작업이 필요하다.

MXS-701CE의 경우 MXS-301CE에 비해 피치값이 크고 두 시편의 측정 과정에서 동일한 라인 스캔 범위를 적용하였기 때문에 한 라인 스캔 프로파일에 포함된 피치의 개수도 적다. 따라서 MXS-701CE의 측정 결과에서 M-AFM의 길이 측정 불확도에서 기인하는 불확도 성분들의 영향이 더 크게 나타난다.

Fig. 8은 두 종류의 격자 시편에 대하여 M-AFM을 이용한 피치 측정 결과와 광 회절계를 이용한 피치 측정 결과를 비교한 것이다. 광 회절계를 이용한 피치 측정 방법에 대한 불확도 분석은 완료되지 않아 입사각의 변화에 따른 피치 측정값의 표준편차값의 3배를 피치 측정값과 함께 나타내었다. M-AFM을 이용하여 측정된 피치값은 광 회절계를 이용한 측정 결과의 표준 편차값에 비해 큰 불확도 값을 갖지만 두 측정 방법을 통하여 얻은 결과는 불확도 범위 내에서 일치함을 알 수 있다.

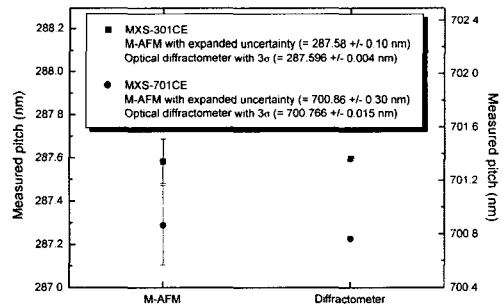


Fig. 8 Comparison between the mean pitch values measured by M-AFM and optical diffractometer

5. 결론

본 연구에서는 상용 AFM 헤드 모듈을 기반으로 한 M-AFM 시스템을 이용하여 1차원 격자 시편의 평균 피치값을 측정하고 측정 불확도를 평가하였다. 라인 스캔 프로파일을 이용한 피치 측정 방법과 평균 피치 계산 방법을 제시하였고 측정 불확도

표현 지침에 따라 피치 측정불확도를 평가하였다. 명목 피치값이 각각 288 nm, 700 nm인 1차원 격자 시편의 평균 피치값을 측정하고 측정 결과와 함께 각 표준불확도 성분 및 확장불확도값을 제시하였다.

불확도 평가 결과에서 보면 여러 가지 표준불확도 성분 중 시편상의 측정 위치에 따른 피치 측정값의 불균일성과 M-AFM을 이용한 길이 측정불확도 성분 중 측정 길이에 비례하는 불확도 성분이 큰 부분을 차지한다. 피치 측정값의 불균일성과 길이 측정 불확도 성분 중 측정 길이에 비례하지 않는 불확도 성분의 영향 등은 평균 피치 측정 과정에서 나타나는 평균화 효과에 의해 감소된다.

광 회절계를 이용한 피치 측정 결과와 비교하였을 때 두 측정 결과는 M-AFM을 이용하여 측정된 피치값의 확장불확도 범위 내에서 일치하였고 M-AFM은 배율 교정 시편의 피치값 인증을 위하여 효과적으로 사용될 수 있음을 알 수 있다.

후 기

본 연구의 일부는 2004년도 기본사업, 테라급 나노소자 개발 사업, 나노 핵심기반 사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 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.
2. Semiconductor Industry Association, "The National Technology Roadmap for Semiconductors," 1999.
3. Postek, M. T., Vladoar, A. E., Jones, S. N. and Keery, W. J., "Interlaboratory study on the lithographically produced scanning electron microscope magnification standard prototype," *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*, Vol. 98, No. 4, pp. 447-467, 1993.
4. 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.
5. Meli, F., Thalman, R. and Blattner, P., "High precision pitch calibration of gratings using laser diffractometry," 1st international conference and general meeting of the euspen society for precision engineering and nanometrology, pp. 252-255, 1999.
6. 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.
7. Meli, F. and Thalmann, R., "Long-range AFM Profiler Used for Accurate Pitch Measurements," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 9, pp. 1087-1092, 1998.
8. Misumi, I., Gonda, S., Kurosawa, T. and Takamasu, K., "Uncertainty in Pitch Measurements of One-Dimensional Grating Standards Using a Nanometrological Atomic Force Microscope," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 14, pp. 463-471, 2003.
9. Schneir, J., McWaid, T. H., Alexander, J. and Wilfley, B. P., "Design of an Atomic Force Microscope with Interferometric Position Control," *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 12, No. 6, pp. 3561-3566, 1994.
10. Picotto, G. B. and Pisani, M., "A Sample Scanning System with Nanometric Accuracy for Quantitative SPM Measurements," *Ultramicroscopy*, Vol. 86, pp. 247-254, 2001.
11. Hasche, K., Herrmann, K., Mirande, W., Seemann, R., Vitushkin, L., Xu, M. and Yu, G., "Calibrated Scanning Force Microscope with Capabilities in the Subnanometre Range," *Surface and Interface Analysis*, Vol. 33, pp. 71-74, 2002.
12. 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, Nov. 2004.
13. ISO, "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement," 1993.