

길이 표준 소급성을 갖는 원자간력 현미경을 이용한 2 차원 격자 시편 측정과 불확도 평가

김종안[#], 김재완^{*}, 강주식^{*}, 엄태봉^{*}

Measurements of Two-dimensional Gratings Using a Metrological Atomic Force Microscope and Uncertainty Evaluation

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

ABSTRACT

The pitch and orthogonality of two-dimensional (2D) gratings have been measured by using a metrological atomic force microscope (MAFM) and measurement uncertainty has been analyzed. Gratings are typical standard artifacts for the calibration of precision microscopes. Since the magnification and orthogonality in two perpendicular axes of microscopes can be calibrated simultaneously using 2D gratings, it is important to certify the pitch and orthogonality of 2D gratings accurately for nano-metrology using precision microscopes. In the measurement of 2D gratings, the MAFM can be used effectively for its nanometric resolution and uncertainty, but a new measurement scheme was required to overcome some limitations of current MAFM such as nonnegligible thermal drift and slow scan speed. Two kinds of 2D gratings, each with the nominal pitch of 300 nm and 1000 nm, were measured using line scans for the pitch measurement of each direction. The expanded uncertainties ($k = 2$) of measured pitch values were less than 0.2 nm and 0.4 nm for each specimen, and those of measured orthogonality were less than 0.09 degree and 0.05 degree respectively. The experimental results measured using the MAFM and optical diffractometer were coincident with each other within the expanded uncertainty of the MAFM. As a future work, we also proposed another scheme for the measurements of 2D gratings to increase the accuracy of calculated peak positions.

Key Words : Metrological atomic force microscope (길이 표준 소급성을 갖는 원자간력 현미경), Nanometrology (나노메트롤로지), 2D grating (2 차원 격자 시편), Uncertainty analysis (불확도 해석)

1. 서론

핵심 치수 (critical dimension)가 100 nm 보다 작은 형상 측정을 다루는 나노메트롤로지 (nano-metrology)는 나노테크놀로지 (NT)의 기반 기술이

된다. 나노메트롤로지에 적용되는 측정 기술은 주로 정밀 현미경을 이용하는 것으로 나노미터 수준의 분해능과 측정 불확도가 요구된다.^{1,2} 세포 크기의 물질을 관찰하고 분석하는 바이오테크놀로지 (BT) 분야에서도 정밀 현미경 기술은 매우 중요한

접수일: 2007 년 4 월 16 일; 게재승인일: 2007 년 7 월 7 일

교신저자: 한국표준과학연구원 기반표준부 길이/시간그룹

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

* 한국표준과학연구원 기반표준부 길이/시간그룹

부분을 차지하고 있다. SEM, TEM, SPM 등이 이러한 분야에서 사용되는 대표적인 정밀 현미경인데, 이러한 측정 장비는 나노미터 수준의 분해능을 가지고 있지만 정확한 길이와 형상 측정값을 얻기 위해서는 정밀한 배율 교정이 반드시 필요하다. 현미경 측정값의 정확도를 향상시키기 위해서 레이저 간섭계나 고성능 변위 센서를 적용하기도 하지만, 많은 비용과 노력이 필요하기 때문에 이러한 작업은 대부분 표준 측정 기관에서만 이루어지고 있다. 따라서 연구소나 산업 현장에서는 인증값을 갖는 격자 피치나 단차 표준 시편(standard artifact) 등을 이용하여 정밀 현미경의 배율을 교정하는 간접적인 방법이 주로 적용된다.

정밀 현미경의 수평 방향 측정 축의 배율을 교정하기 위해서 격자 피치 표준 시편이 널리 사용된다.^{3,4} 격자 피치 표준 시편은 1 축 방향의 주기적인 형상을 갖는 1 차원 격자 시편과 2 축 방향의 주기적인 형상을 갖는 2 차원 격자 시편으로 구분된다. 대부분의 정밀 현미경은 2 차원 이미지를 측정하기 때문에 2 차원 격자 피치 시편을 이용하여 2 축 방향의 배율과 측정 축간의 직교도(orthogonality)를 교정하는 것이 필요하다. 따라서 2 차원 격자 시편을 정확하게 교정할 수 있는 능력을 확보하는 것은 정밀 현미경의 성능 향상을 위해 매우 중요하다.

2 차원 격자 시편의 측정을 위해서는 광 회절계(optical diffractometer)^{5,6}, 길이 표준 소급성을 갖는 원자간력 현미경(MAFM)^{7,9} 등이 주로 이용된다. 광 회절계를 이용한 피치 측정 방법은 매우 높은 측정 정밀도를 가지고 있지만 평균 피치값만을 측정할 수 있다. 그러나 MAFM을 이용한 피치 측정 방법은 평균 피치값과 함께 개별 피치값과 시편 표면의 프로파일 정보를 함께 얻을 수 있는 장점을 가진다. 따라서 이 두 가지 측정 방법은 2 차원 격자 시편 측정에 상호 보완적으로 적용될 수 있다.

본 연구에서는 측정에 사용된 MAFM이 갖는 성능 한계를 고려하여 라인 스캔을 이용한 2 차원 격자 시편 측정 방법을 제시한다. 고안된 측정 방법의 적용을 위해 시편 회전각 정렬을 위한 정밀 회전 스테이지를 부착하였고 라인 스캔 시작 위치 설정을 위한 피치 구조물의 피크 위치 찾기 방법을 추가하였다. 제안된 측정 방법을 이용하여 두 종류의 2 차원 격자 시편을 측정하고 측정 불확도

를 분석한다. 광 회절계를 이용한 측정 결과와의 비교를 통하여 MAFM을 이용한 2 차원 격자 시편 인증 방법의 타당성을 검증한다.

2. 측정 방법

2.1 MAFM

2 차원 격자 시편 측정에 사용된 MAFM은 AFM 헤드 모듈, 나노스캐너, 2 축 레이저 간섭계 그리고 제어 및 데이터 처리 모듈 등으로 구성된다(Fig. 1). 상용 AFM의 측정 성능을 향상시키기 위해서 헤드 모듈에 내장된 3 축 PZT 튜브 스캐너를 탄성 힌지를 이용한 나노스캐너로 교체하고 1.24 nm의 길이 측정 분해능을 갖는 2 축 간섭계를 부착하였다. 제작된 MAFM의 측정 영역은 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ ($x \times y \times z$)이고 이를 이용한 길이 측정값 L 이 갖는 확장 불확도 ($k=2$)는 $\sqrt{(4.2 \text{ nm})^2 + (2.8 \times 10^{-4} \times L)^2}$ 이다.⁹

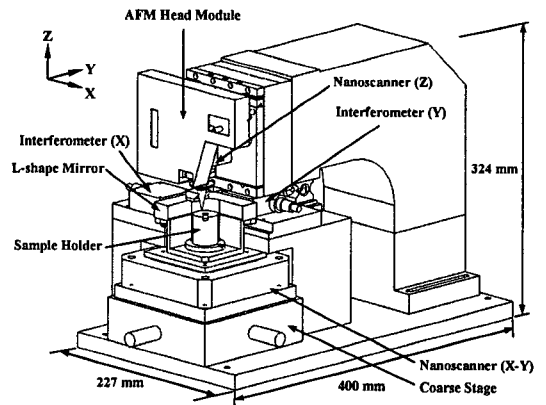


Fig. 1 Schematic diagram of the metrological atomic force microscope at KRISS

2.2.2 차원 격자 시편 측정

2 차원 격자 시편의 측정 항목은 x 축과 y 축 방향의 격자 피치인 p_x, p_y 와 두 피치 방향의 사잇각을 나타내는 직교도 α 이다(Fig. 2). 2 차원 격자 시편의 측정 방법으로는 다음과 같은 2 가지의 측정 방법을 고려할 수 있다. 첫번째는 격자 시편의 2 차원 스캔 이미지를 획득한 뒤, 2 차원 데이터 처리 알고리즘을 적용하여 각 측정 항목 값을 계산하는 것이다. 두번째는 각 피치 방향에 대해 1

차원 격자 피치 측정 방법을 적용하여 각 측정 항목값을 얻는 것이다. 이러한 측정 방법의 선택은 측정 시스템의 성능과 밀접하게 관계된다.

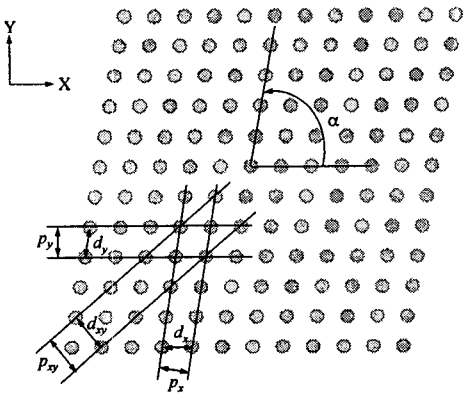


Fig. 2 The schematic and measurands of two-dimensional grating

대표적인 2 차원 데이터 처리 알고리즘인 2 차원 FFT (Fast Fourier Transform)를 적용하여 측정 항목 값을 계산하기 위해서는 일정한 위치 간격으로 기록된 2 차원 스캔 이미지가 필요하다. 그런데 이러한 계산값의 정확도는 계산에 사용된 데이터의 개수와 비례하기 때문에, 계산값의 정확도를 향상시키기 위해서는 2 차원 스캔 영역과 분해능을 증가시켜야 하고 이에 따라 측정 시간도 크게 늘어난다. 따라서 2 차원 스캔 이미지 획득 시간 동안 열팽창으로 인한 측정값의 드리프트가 크게 발생할 수 있기 때문에 이를 감소시키기 위해서는 MAFM의 매우 낮은 열팽창 특성과 높은 측정 속도가 요구된다.

본 연구에서 사용된 MAFM의 열팽창으로 인한 길이 측정값의 드리프트는 1.6 nm/min으로 다소 높고, 측정된 형상 이미지의 왜곡을 최소화하기 위해서는 스캔 속도를 2 μm/s 정도로 제한하여야 한다.⁹ 따라서 40 μm × 40 μm 범위에서 2048 × 2048의 분해능으로 2 차원 스캔 이미지를 얻는다고 하였을 때, 약 680 분 정도의 측정 시간이 필요하고 이 때 나타나는 slow 축 길이 측정값의 드리프트는 1 μm 이상이 된다. 만약 계산값의 정확도를 증가시키기 위해서 스캔 영역이나 분해능을 향상시키는 경우에는 측정 시간과 길이 측정값의 드리프트는 더 크게 나타날 것이다. 이러한 이유로

본 연구에서는 각 피치 방향에 대해 1 차원 격자 피치 측정 방법을 적용하는 두번째 측정 방법을 이용하여 2 차원 격자 시편을 측정한다.

1 차원 격자 시편의 측정 방법을 적용하여 2 차원 격자 시편의 각 방향 피치값을 측정하기 위해서는 몇 가지 추가적인 고려 사항과 준비 작업이 필요하다. 2 차원 격자 시편에서는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 여러 방향의 피치 라인이 존재하기 때문에, 1 차원 피치 측정에서와 같이 라인 스캔 (line scan)을 이용하여 평균 피치값을 측정하기 위해서는 MAFM의 스캔 라인이 측정하고자 하는 피치 구조물의 피크 (peak)를 정확히 따라갈 수 있도록 격자 시편의 회전각과 스캔 라인의 시작 위치를 조절해 주어야 한다.

2 차원 격자 시편의 피치 방향을 MAFM의 스캔 라인 방향과 일치되도록 정렬하기 위해서 시편 고정부에 Fig. 3과 같은 정밀 회전 스테이지를 부착하였다.

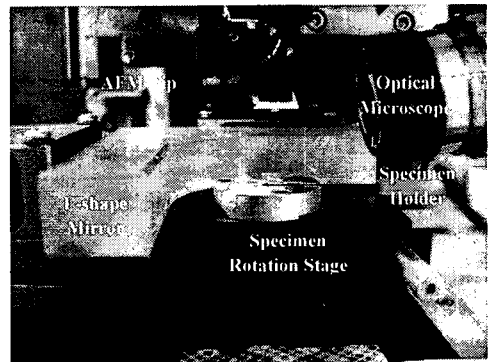


Fig. 3 Precision rotation stage for the rotational alignment of specimens

정밀 회전 스테이지는 소형 마이크로미터와 힌지 구조물을 이용하여 제작되었으며, 회전 중심축이 MAFM 팁의 끝 단과 일치하도록 설계되었다. 회전 스테이지의 회전각 조절 범위는 ±5°이고 분해능은 1' 이하이다. 전체 라인 스캔 범위에서 인접한 피치 라인으로 벗어나지 않아야 하기 때문에 시편의 회전각 정렬 과정에서 요구되는 정확도는 라인 스캔 범위가 증가될수록, 격자 피치의 크기가 감소될수록 증가된다. 300 nm의 격자 피치값을 갖는 2 차원 격자 시편을 100 μm 라인 스캔 범위에서 측정할 때, 인접한 피치 라인으로 벗어나는

회전각 정렬 오차값을 기하학적으로 계산해 보면 10'이 된다. 따라서 정확한 시편 프로파일을 얻기 위해서는 이보다 낮은 수준의 회전각 정렬 오차가 요구된다.

스캔 라인의 시작 위치를 결정하기 위해서는 피치 구조물의 피크 위치를 찾는 과정이 필요하다. 작은 영역에서 얻어진 2 차원 스캔 이미지를 이용하여 피크 위치를 결정한다. 이 과정에서 이용되는 2 차원 스캔 이미지의 영역은 스캔 이미지 중앙부에 1 개 이상의 피치 구조물이 측정되도록 한다. 획득된 2 차원 스캔 이미지에 무게 중심법과 같은 2 차원 피크 찾기 알고리즘을 적용하여 피크 위치를 계산하고 이를 스캔 라인의 시작 위치로 설정한다.¹⁰

2.3 격자 피치 측정

MAFM 을 이용하여 2 차원 격자 시편의 각 방향 평균 피치값을 측정하기 위해서 라인 스캔을 이용하여 격자 시편 표면의 형상을 획득하고, 이를 해석하여 피치값을 계산한다. 피치 구조물의 정확한 형상을 측정하기 위해서는 앞에서 설명된 시편 회전각 정렬과 스캔 라인의 시작 위치 정렬이 정확하게 이루어져야 한다. 등간격을 갖는 여러 개의 스캔 라인을 이용한 시편 회전각 계산과 피치값 계산을 위한 전 처리과정은 1 차원 격자 시편 측정과 동일하다.¹⁰

그러나 2 차원 격자 피치 측정의 경우, 라인 스캔을 통하여 얻어진 형상 프로파일을 해석하여 얻어진 피치값은 피치 구조물 간 거리의 평균값으로 실제 피치값과는 식 (1)과 같은 관계를 갖는다 (Fig. 2).

$$\begin{aligned} p_x &= d_x \sin \alpha \\ p_y &= d_y \sin \alpha \end{aligned} \quad (1)$$

위 식에서 p_x, p_y 는 x 축과 y 축 방향의 평균 피치값, d_x, d_y 는 x 축과 y 축 방향의 피치 구조물 간의 평균 거리값, α 는 시편의 직교도를 각각 나타낸다. 이러한 점을 고려하면 각 방향의 평균 피치값 p 는 식 (2)와 같이 계산된다.¹⁰

$$\begin{aligned} p &= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M p_i \\ &= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{L_i}{N_i} C_s C_t \sin \alpha \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{L_i}{N_i} \frac{\cos \theta_z}{\cos \theta_y} [1 - \alpha_m (t - 20)] \sin \alpha \quad (2)$$

위 식에서 M 은 전체 측정 위치의 개수, p_i 는 i 번째 측정 위치에서의 평균 피치값, L_i 는 i 번째 측정 위치에서 처음과 끝 피크 위치간의 거리, N_i 는 i 번째 라인 스캔 프로파일에 포함된 개별 피치 개수, C_s 는 코사인 오차 보상항, C_t 는 온도 보상항, θ_z 는 시편의 회전각, θ_y 는 시편의 기울어짐각, α_m 은 격자 시편 재질의 열팽창계수, 그리고 t 는 시편의 온도를 각각 나타낸다.¹⁰

2.4 직교도 측정

2 차원 격자 시편의 x 축과 y 축 피치 방향의 사잇각인 직교도를 계산하기 위해서 대각선 방향의 피치 구조물 간의 평균 거리값 d_{xy} 를 추가적으로 측정한다(Fig. 2). 측정 방법은 다른 방향 피치 구조물 간 평균 거리 측정 방법과 동일하다. 측정된 각 방향 피치 구조물 간의 평균 거리값 d_x, d_y, d_{xy} 를 코사인 제 2 법칙에 대입하여 정리하면 식 (3)과 같이 2 차원 격자 시편의 직교도를 계산할 수 있다.

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{d_x^2 + d_y^2 - d_{xy}^2}{2d_x d_y} \right) \quad (3)$$

위 식에서 α 는 시편의 직교도, d_x, d_y, d_{xy} 는 x 축, y 축, 그리고 대각선 방향의 피치 구조물 간의 평균 거리값을 각각 나타낸다.

3. 측정 불확도

3.1 격자 피치

격자 피치 측정 불확도를 측정 불확도 표현 지침을 이용하여 평가한다.¹¹ 식 (2)를 격자 피치 측정의 수학적 모델로 설정하고 불확도 전파 법칙을 적용한 뒤 정리하면 식 (4)와 같이 피치 측정의 합성 표준 불확도 $u_c(p)$ 를 구할 수 있다.¹⁰

$$\begin{aligned} u_c^2(p) &= \left(\frac{C_s C_t}{N} \right)^2 \left[a^2 + u^2(L_p) + u^2(L_r) + u^2(L_u) \right] \\ &+ \left[b^2 + \frac{u^2(C_s)}{C_s^2} + \frac{u^2(C_t)}{C_t^2} + \frac{u^2(\alpha)}{\tan^2 \alpha} \right] p^2 \end{aligned} \quad (4)$$

위 식에서 a, b 는 $\sqrt{a^2 + b^2 L^2}$ 형태로 표현된

MAFM 을 이용한 길이 측정 불확도 수식 중 길이 측정값 L 에 관련되지 않은 항과 관련된 항에 각각 해당된다.¹⁰ 또한 $u(L_p)$ 은 피크 위치 계산 과정의 불확도, $u(L_r)$ 은 피크 위치간 거리 측정 반복도에 의한 불확도, $u(L_u)$ 시편의 불균일도에 의한 불확도, $u(C_s)$ 코사인 오차 보정항의 불확도, $u(C_i)$ 은 온도 보정항의 불확도, 그리고 $u(\alpha)$ 은 직교도 측정 불확도를 각각 나타낸다. 그리고 각 방향 피치 구조물 간 평균 거리값 d 의 합성 표준 불확도 $u_c(d)$ 도 유사한 방법을 통하여 식 (5)와 같이 표현된다.

$$u_c^2(d) = \left(\frac{C_s C_i}{N} \right)^2 \left[d^2 + u^2(L_p) + u^2(L_r) + u^2(L_u) \right] + \left[b^2 + \frac{u^2(C_s)}{C_s^2} + \frac{u^2(C_i)}{C_i^2} \right] d^2 \quad (5)$$

3.2 직교도

직교도 측정 불확도 해석의 경우에도 식 (3)을 수학적 모델로 설정하고 불확도 전파 법칙을 적용하여 식 (6)과 같이 합성 표준불확도를 계산할 수 있다.¹¹

$$u_c^2(\alpha) = \left(\frac{\partial \alpha}{\partial d_x} \right)^2 u^2(d_x) + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial d_y} \right)^2 u^2(d_y) + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial d_{xy}} \right)^2 u^2(d_{xy}) \quad (6)$$

직교도는 식 (3)과 같이 각 방향 피치 구조물간의 평균 거리값을 이용하여 계산되기 때문에, 각 평균 거리값의 측정불확도가 직교도 측정의 불확도 요인이 된다. 따라서 각 방향 피치 구조물간 평균 거리값을 이용하여 계산되는 민감도 계수 값과 식 (5)와 같이 계산된 각 방향 피치 구조물간 평균 거리값의 측정불확도를 식 (6)에 대입하여 직교도 측정값의 합성 표준불확도를 얻을 수 있다.

4. 측정 실험

4.1 실험 방법

2 차원 격자 시편 측정 실험에 사용된 시편은 Moxtex 社의 2D300 과 Ibsen 社의 2D1000 이다. 각 방향 피치의 명목값은 각각 300 nm 와 1000 nm 이고 직교도의 명목값은 90° 이다. 2 차원 격자 시편

의 각 방향 평균 피치값 측정에 적용된 방법은 1 차원 격자 시편의 경우와 유사하다. 그러나 2 차원 격자 시편 측정의 경우에는 1 차원 격자 시편에서와 같이 피치 라인이 연속되지 않기 때문에 라인 스캔의 시작 위치와 시편의 회전각 정렬이 정확하게 이루어 지지 않으면 전체 라인 스캔 영역에서 정확한 시편의 형상 프로파일을 얻을 수 없게 된다(Fig. 2).

시편 회전각 정렬을 위해 제한된 영역의 2 차원 스캔 이미지를 이용하여 측정될 피치 라인이 x 축과 평행하도록 시편의 조동 회전각 정렬을 우선적으로 수행한다. 시편의 미동 회전각 정렬을 위해서는 y 축 방향으로 피치 간격의 정수배 만큼 떨어진 위치에서 10 개의 라인 스캔 프로파일을 얻은 뒤 이를 해석하여 시편의 회전각을 계산하고, 계산된 시편 회전각을 정밀 시편 회전 스테이지를 이용하여 보정한다.¹⁰ 이러한 시편의 미동 회전각 정렬을 시편의 회전각이 회전 스테이지의 분해능 이하가 될 때까지 진행한다.

이와 같은 시편 회전각 정렬 작업을 통하여 측정하려는 피치 방향과 MAFM 의 라인 스캔 방향 (x 축)을 일치시킨다. 시편의 중심부 1 mm × 1 mm 영역에서 0.5 mm 간격으로 3 × 3 패턴으로 균일하게 분포된 9 개의 측정 위치에서 95 μm 범위의 라인 스캔을 통하여 시편의 형상 프로파일을 얻는다. 획득된 형상 프로파일에서 피크 위치를 찾고 식 (2)를 이용하여 각 피치 방향의 평균 피치값을 계산하고 식 (3)을 이용하여 직교도값을 구한다.¹⁰

4.2 불확도 평가

실험에 사용된 2 차원 격자 시편의 x 축 방향 피치 측정값의 측정 불확도는 Table 1 과 같고 합성 표준불확도에 대한 각 불확도 성분의 기여량을 나타낸 것이다. 기여량은 감도 계수 (sensitivity coefficient)와 각 불확도 성분의 표준불확도 값을 곱한 것으로 각 불확도 요인의 중요도를 판단하는 기준이 된다. 각 표준불확도 값의 산출 방법은 1 차원 격자 피치 시편 측정의 경우와 동일하다.¹⁰

식 (4)에 나타난 각 불확도 성분의 감도 계수를 살펴보면 스캔 라인 프로파일에 포함된 피치 개수인 N 으로 나뉘어 지는 부분과 공칭 피치값인 p 가 곱해지는 부분으로 구분된다. 각 시편의 측정에서 동일한 라인 스캔 범위를 선택하였기 때문에

N 과 p 는 서로 반비례하고 두 값의 곱은 일정한 값을 갖는다. 따라서 일반적인 경우 동일한 측정 조건을 적용하였을 때에는 공칭 피치값이 작을수록 p 가 감소되고 N 이 증가되어 전체적인 피치 측정 불확도가 감소되는 평균화 효과(averaging effect)가 나타난다. 그러나 주요 불확도 성분 중 피치 측정 반복도, 시편의 균일도 등과 같이 시편의 상태와 직접적으로 관계되는 성분은 공칭 피치값의 크기 보다는 시편 상태와 더 밀접한 관계를 갖는다.

각 불확도 성분의 기여량을 비교하여 나타낸 Fig. 4 를 보면 MAFM 을 이용한 길이 측정 불확도, 피치 측정 반복도, 시편의 균일도, 피크 찾기 방법이 주요한 불확도 요인이 되고 코사인 오차 보상항, 온도 보상항, 직교도로부터 발생하는 불확도 기여량은 거의 무시할 수 있는 수준이다. 각 시편의 피치 측정 불확도 중에서 MAFM 의 길이 측정 불확도와 관련된 항 a , b 에서 기인한 불확도 기여량은 공칭 피치값의 크기와 비례한다.¹⁰ 그러나 격자 시편의 상태와 직접적으로 관계되는 피치 측정 반복도, 시편의 균일도, 피크 찾기 방법에서 발생하는 불확도는 두 시편의 경우 거의 비슷한 크기의 값을 갖는다. 이는 2D300 시편의 경우가 2D1000 에 비해 시편 상태가 좋지 못하기 때문에 앞에서 언급한 평균화 효과에도 불구하고 거의 비슷한 수준의 불확도 기여량을 나타낸다.

2 차원 격자 피치 측정의 불확도 해석 결과를 1 차원 격자 피치 측정의 경우와 비교했을 때 피크 찾기 방법에서 발생하는 불확도가 다소 크게 나타남을 알 수 있다.¹⁰ 라인 스캔으로 얻어지는 시편의 프로파일은 대부분 주기적으로 반복되는 사인파 (sinusoidal wave)나 구형파 (rectangular wave)의 형태를 갖는다. 따라서 이상적인 형상 프로파일이 얻어지는 경우에는 두 가지 피크 찾기 방법 (무게 중심법, 영점 교차법)을 이용하여 동일

한 피크 위치값을 얻을 수 있다. 그러나 현실적으로는 완전한 대칭성을 갖는 이상적인 프로파일을 얻을 수 없기 때문에 두 피크 위치 계산 방법간의 차가 발생되고 이로 인해 측정 불확도가 발생된다.

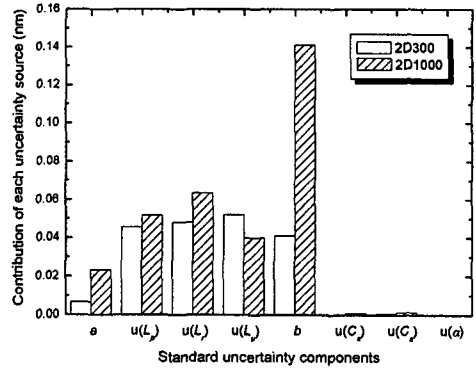


Fig. 4 Comparison of the contribution of each uncertainty source to the combined uncertainty in the measurement of p_x

제안된 방법을 이용한 2 차원 피치 측정에서는 시편의 회전각 정렬과 라인 스캔의 시작 위치 찾기 과정이 완전하게 이루어지지 못할 때에는, 스캔 라인이 각 피치 구조물의 피크 위치에서 벗어나게 되고 얻어지는 라인 스캔 프로파일은 이상적인 형태에서 더욱 벗어나게 된다. 이러한 원인 때문에 2 차원 피치 측정 결과에서 피크 위치 계산 방법으로 인한 불확도가 1 차원 피치 측정 결과보다 더 크게 발생하는 것으로 추론된다.

시편의 피치값이 감소될 수록 더욱 정확한 시편 회전각 정렬과 시작 위치 설정이 요구되는데, 이러한 불확도 요인의 영향을 감소시키기 위해서는 한 개의 라인 스캔 프로파일로부터 피크 위치를 계산하기 보다는 y 축 방향으로 제한적인 스캔 범위를 갖는 2 차원 영역 스캔을 이용하는 방법을

Table 1 Uncertainty in p_x measurements of 2D300 and 2D1000 using the MAFM

Specimen	각 불확도 요인의 기여량, $u_i(p_x) \equiv c_i u(x_i)$ (nm)							
	a	$u(L_p)$	$u(L_r)$	$u(L_u)$	b	$u(C_s)$	$u(C_t)$	$u(\alpha)$
2D300	6.49E-3	4.56E-2	4.82E-2	5.19E-2	4.10E-2	2.13E-4	4.36E-4	1.36E-4
2D1000	2.33E-2	6.36E-2	4.00E-2	5.16E-2	1.41E-1	8.26E-4	1.28E-3	5.81E-6

적용할 수도 있다. 주요한 스캔 방향인 x 축에 대해서는 충분한 평균화 효과를 얻을 수 있도록 스캔 범위를 최대화 하고 y 축 방향으로로는 1 개 정도의 피크 구조물이 포함되도록 스캔 범위를 제한한다. 이렇게 함으로써 피크 위치 계산 과정에서 발생하는 측정 불확도를 감소시킬 수 있고 측정 시간의 증가에 따른 측정 불확도 증가를 최소화할 수 있을 것이다.

2 차원 격자 시편의 직각도 측정에 대한 측정 불확도 평가 결과는 Table 2 와 같다.

Table 2 Uncertainty in α measurements of 2D300 and 2D1000 using the MAFM

Specimen	각 불확도 요인의 기여량 $u_i(p_x) \equiv c_i u(x_i)$ (rad)		
	$u(d_x)$	$u(d_y)$	$u(d_{xy})$
2D300	3.24E-4	3.52E-4	6.13E-4
2D1000	1.69E-4	1.59E-4	3.18E-4

식 (3)과 같이 피치 구조물 간의 평균 거리값을 이용하여 직각도를 계산하기 때문에 평균 거리 측정값의 불확도가 직각도 측정의 주요한 불확도 요인이 된다. 불확도 해석 결과에서 보면 직각도 측정에서는 2D300 의 경우가 더 큰 측정 불확도를 갖고 있음을 알 수 있다. 각 피치 방향 평균 거리 측정값의 불확도는 2D300 의 경우가 더 작지만 감도 계수에 각 방향 피치 구조물 간 평균 거리의 역수가 포함된다. 따라서 각 불확도 요인의 기여량은 상대 불확도의 크기로 결정되고, 각 피치 방향 평균 거리 측정값의 상대 불확도가 2D300 의 경우가 더 크기 때문에 직각도 측정 불확도도 증가된다.

MAFM 과 광 회절계 ⁶ 를 이용한 2 차원 격자 시편의 측정 결과는 Fig. 5~7 과 같다.

측정 실험에 사용된 2 차원 격자 시편의 각 방향 격자 피치값과 직교도 측정값을 비교한 것으로 측정 결과의 확장 불확도 ($k = 2$)를 함께 나타내었다. 광 회절계 측정값의 불확도는 MAFM 에 비해 1/10 정도의 수준이다.⁶ 따라서 이를 이용하여 MAFM 측정값의 정확도를 판단할 수 있을 것이다. 각 측정값의 비교 결과에서 보면 두 가지 측정 방법의 측정값은 MAFM 측정 불확도 범위 내에서

서로 일치함을 알 수 있다.

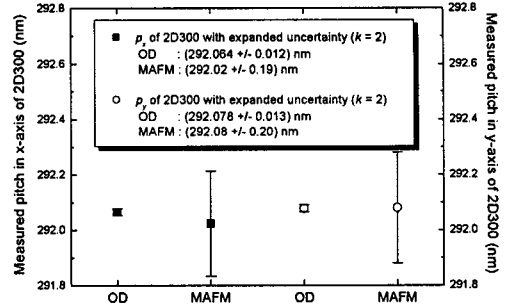


Fig. 5 Measured average pitch values (p_x, p_y) of 2D300 using MAFM and optical diffractometer

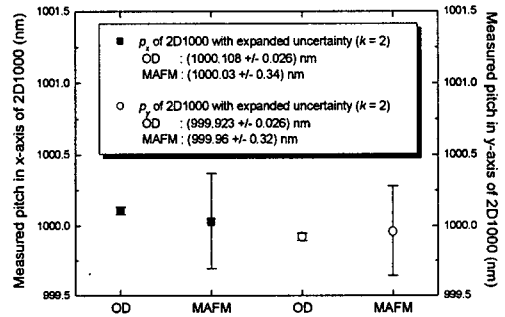


Fig. 6 Measured average pitch values (p_x, p_y) of 2D1000 using MAFM and optical diffractometer

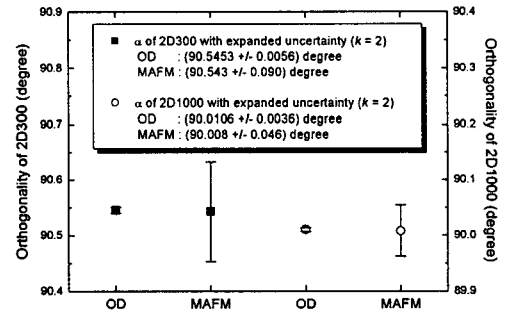


Fig. 7 Measured orthogonality (α) of 2D300 and 2D1000 using MAFM and optical diffractometer

5. 결론

본 연구에서는 MAFM 을 이용하여 2 차원 격

자 시편의 각 방향 평균 피치값과 직각도를 측정하고 측정 불확도를 평가하였다. 측정 시스템의 한계를 고려하여 라인 스캔을 이용한 2 차원 격자 시편 측정 방법을 제시하고 이를 적용하기 위해 시편의 회전각 정렬과 피크 위치 찾기 과정을 추가하였다. 명목 피치값이 각각 300 nm, 1000 nm 인 2 차원 격자 시편을 측정하고 불확도 해석을 통하여 각 불확도 성분의 기여량을 평가하였다. 각 시편의 평균 피치 측정값의 확장 불확도 ($k = 2$)는 0.2 nm, 0.4 nm 수준이고, 직각도 측정값의 경우는 0.09°, 0.05° 이하의 확장 불확도를 갖는다. 광 회절계를 이용한 측정 결과와 비교하였을 때, 두 측정 결과는 MAFM 을 이용한 측정 결과의 확장 불확도 범위 내에서 일치하였고 MAFM 은 2 차원 격자 피치 시편의 측정을 위하여 효과적으로 사용될 수 있음을 알 수 있다.

참고문헌

1. Teague, E. C., "Nanometrology," Proc. AIP Conf. Scanned Probe Microscopy, Vol. 241, p. 371, 1991.
2. Carneiro, K., "The need for metrology in nanotechnology," Danish Institute of Fundamental Merology, p. 2, 2001.
3. Postek, M. T., Vldar, 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 B, Vol. 6, Issue 6, 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., Kim, J. W., Park, B. C., Kang, C. S. and Eom, T. B., "Measurement of grating pitch standards using optical diffractometry and uncertainty analysis," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 23, No. 8, pp. 72-79, 2004.
7. Meli, F. and Thalmann, R., "Long-range AFM profiler used for accurate pitch measurements," Meas. Sci. Technol., Vol. 9, No. 7, 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, No. 4, pp. 463-471, 2003.
9. 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 the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 21, No. 11, pp. 75-82, 2004.
10. 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 uncertainty evaluation," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 22, No. 4, pp. 84-91, 2005.
11. ISO, "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement," ISO, 1993.