

# 광 회절계를 이용한 격자 피치 표준 시편의 측정 및 불확도 해석

김종안#, 김재완\*, 박병천\*, 강주식\*, 엄태봉\*

## Measurement of Grating Pitch Standards using Optical Diffractometry and Uncertainty Analysis

Jong-Ahn Kim<sup>#</sup>, Jae Wan Kim<sup>\*</sup>, Byong Chon Park<sup>\*</sup>, Chu-Shik Kang<sup>\*</sup> and Tae Bong Eom<sup>\*</sup>

### ABSTRACT

We measured grating pitch standards using optical diffractometry and analyzed measurement uncertainty. Grating pitch standards have been used widely as a magnification standard for a scanning electron microscope (SEM) and a scanning probe microscope (SPM). Thus, to establish the meter-traceability in nano-metrology using SPM and SEM, it is important to certify grating pitch standards accurately. The optical diffractometer consists of two laser sources, argon ion laser (488 nm) and He-Cd laser (325 nm), optics to make an incident beam, a precision rotary table and a quadrant photo-diode to detect the position of diffraction beam. The precision rotary table incorporates a calibrated angle encoder, enabling the precise and accurate measurement of diffraction angle. Applying the measured diffraction angle to the grating equation, the mean pitch of grating specimen can be obtained very accurately. The pitch and orthogonality of two-dimensional grating pitch standards were measured, and the measurement uncertainty was analyzed according to the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. The expanded uncertainties ( $k = 2$ ) in pitch measurement were less than 0.015 nm and 0.03 nm for the specimen with the nominal pitch of 300 nm and 1000 nm. In the case of orthogonality measurement, the expanded uncertainties were less than 0.006°. In the pitch measurement, the main uncertainty source was the variation of measured pitch values according to the diffraction order. The measurement results show that the optical diffractometry can be used as an effective calibration tool for grating pitch standards.

**Key Words** : Optical diffractometry (광 회절계), Grating pitch standards (격자 피치 표준 시편), Magnification standards (배율 교정 시편), Uncertainty analysis (불확도 해석)

### 1. 서론

현미경 기술의 발전은 생명공학, 반도체공학과 같은 여러 가지 첨단 과학 기술의 탄생과 발전을

가능하게 하였고, 근래 들어서는 나노 기술 (nano-technology, NT) 및 바이오 기술 (bio-technology, BT)의 활발한 연구로 인하여 보다 높은 수준의 현미경 기술 개발이 요구되고 있다.<sup>1</sup> 광학 현미경의

☞ 접수일: 2006년 2월 28일; 게재승인일: 2006년 7월 7일  
# 교신저자: 한국표준과학연구원 기반표준부 길이/시간그룹  
E-mail jakim@kriss.re.kr Tel. (042) 868-5683  
\* 한국표준과학연구원 기반표준부 길이/시간그룹

분해능 한계를 극복하기 위하여 주사 전자 현미경 (SEM)과 주사 탐침 현미경 (SPM)과 같은 새로운 현미경이 개발되어 사용되고 있고, 이러한 현미경의 이용은 관련 연구와 산업 발전을 더욱 가속화시키고 있다. 그런데 이러한 현미경 기술을 이용하여 미소한 물체의 크기와 형상을 보다 정확하게 측정하기 위해서는 길이 측정 값의 기준이 되는 현미경 배율의 교정이 매우 중요하다.

SEM 이나 SPM 과 같은 고성능 현미경의 배율 교정을 위해서는 시편의 구조적 안정성과 적용이 용이한 1 차원 또는 2 차원 격자 피치 표준 시편이 널리 이용되고 있는데<sup>2,3</sup>, 격자 피치의 크기와 격자 피치 방향 간의 직교도 (orthogonality)를 이용하여 현미경의 배율과 측정 축 간의 직교도를 교정할 수 있다. 따라서 격자 피치 표준 시편의 측정 능력을 확보함으로써 NT, BT 와 같은 여러 가지 첨단 연구와 산업 발전에 기여할 수 있다.

대표적인 격자 피치 표준 시편의 측정 방법으로는 광 회절계 (optical diffractometry)<sup>3,4</sup>와 길이 표준 소급성을 갖는 원자간력 현미경 (MAFM)<sup>5-7</sup>이 있다. 길이 표준 소급성을 갖는 광학 현미경과 SEM 도 제한적으로 이용되기는 하지만 광학 현미경의 경우에는 분해능의 한계, SEM 의 경우에는 사용 환경의 제한 등으로 인해 광 회절계와 MAFM 가 보다 널리 적용되고 있다.

광 회절계와 MAFM 은 서로 다른 측정 원리와 장단점을 가지고 있기 때문에 서로 상보적인 측정 결과를 제공할 수 있다. 광 회절계는 MAFM 에 비해 평균 값만을 측정할 수 있고, 용이한 측정을 위하여 0.5 mm × 0.5 mm 이상의 시편 면적이 요구되는 제한점을 가지고 있다. 그러나 일반적으로 MAFM 에 비하여 10 배 이상의 높은 정확도를 얻을 수 있고, 측정 시간이 훨씬 짧다는 장점을 가지고 있다.<sup>4</sup>

격자 피치 표준 시편의 측정을 위하여 Y. Nakayama 등<sup>3</sup>은 전통적인 방식의 광 회절계를 이용하였고, V. I. Korotkov 등<sup>8</sup>과 L. F. Vitushkin 등<sup>9</sup>은 간섭 방식의 회절계를 적용하여 전통적인 방식의 광 회절계 보다 작은 측정 불확도를 얻었다고 보고하였다. F. Meli 등<sup>4,5</sup>은 레이저를 광원으로 이용하는 회절계를 구성하여 2 차원 격자 피치 시편을 측정하였고, 간섭계로 제어되는 스테이지를 이용한 MAFM 을 개발하여 1 차원 격자 피치 시편 측정에 적용하였다. 각국의 NMI (National Measurement Institute)을 중심으로 MAFM 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데, 격자 피치 시편의 측정 결과를 이용하여 개발된 측정 시스템의 성능을 평가하고 있다.<sup>5,7</sup>

본 논문에서는 Littrow 방식의 광 회절계를 이용한 격자 피치 표준 시편의 측정과 측정 불확도 해석에 대하여 서술한다. 먼저 광 회절계의 측정 원리와 구성에 대하여 설명하고 이를 이용한 격자 피치 측정 방법을 기술한다. 불확도 해석을 통하여 격자 피치 시편 측정 시에 발생하는 불확도 요인을 분석하고 평가한다. 측정 실험을 통하여 광 회절계를 이용한 격자 피치 시편 측정의 타당성을 검증한다.

## 2. 광 회절계

### 2.1 측정 원리

광 회절계는 빛의 회절 (diffraction) 현상을 이용하여 격자 피치 (grating pitch)를 광학적으로 측정하는 방법이다. 회절 격자 시편에서 발생하는 회절광의 진행 방향은 입사광의 파장, 격자 시편의 피치, 입사각에 의해 정밀하게 결정된다. 이러한 관계식을 회절 격자식 (grating equation)이라 하며 식 (1)과 같이 표현된다.

$$p \cdot (\sin\theta_d - \sin\theta_i) = m \cdot \lambda \quad (1)$$

위 식에서  $p$  는 격자 피치,  $\theta_d$  는 회절각,  $\theta_i$  는 입사각,  $m$  는 회절 차수,  $\lambda$  는 입사광의 파장을 각각 나타낸다. 따라서 파장 값을 알고 있는 레이저 광원을 격자 시편에 입사시키고 시편에서 발생하는 회절광의 회절각과 레이저 광원의 입사각을 측정하면 시편의 격자 피치 값을 측정할 수 있다.

### 2.2 구성

격자 피치 측정을 위한 광 회절계는 입사광과 회절광이 일치할 때의 회절각을 측정하는 Littrow 방식으로 구성하였다 (Fig. 1). Ar ion 레이저 ( $\lambda = 488 \text{ nm}$ )와 He-Cd 레이저 ( $\lambda = 325 \text{ nm}$ )를 광원으로 이용하고, attenuator 를 사용하여 입사광의 세기를 조절한다. Spatial filter 를 통과시켜 입사광이 Gaussian 분포를 가지도록 하고, 최종단에서 collimator 를 이용하여 시편 면에 입사되는 빔의 크기를 조절한다. 입사광의 진행 방향은 두 개의 거울을 이용하여 조절되며, 입사광이 정밀 회전 원판의 회전면과 평행하고 회전 중심을 지나도록 정렬한다. 이러한 입사 광학계는 사용된 광원의 파장에 적합하도록 별도로 구성되었다.

시편을 회전시키기 위한 정밀 회전 원판은 회전 스테이지 (RTM350, Newport)와 각도 엔코더

(RPN886, Heidenhain)를 이용하여 구성된다. 마이크로 스텝핑 제어 방식을 이용한 정밀 회전 원판의 구동 분해능은 0.000 05°이고 각도 엔코더 출력 값의 분해능은 0.000 01°이다. 시편은 정밀 회전 원판의 중심에 고정되며, 시편 고정부에는 시편의 위치와 기울어짐을 정밀하게 조절할 수 있도록 6축 미세 조절 기구가 장착되어 있다. 시편에서 발생된 회절광의 위치는 4 분할 포토다이오드를 사용하여 감지되며, 사용되는 광원의 파장에 따라 두 종류의 감지기가 사용된다. 4 분할 포토다이오드로는 수직과 수평 방향의 회절광 위치를 감지할 수 있기 때문에, 회절광의 회절 평면 상의 위치뿐만 아니라 회절 평면과 수직인 방향의 위치도 측정할 수 있다. 따라서 시편의 회절 평면과 수직인 방향의 기울어짐을 조절하여 측정 시에 발생하는 코사인 오차를 최소화 할 수 있다. 감지기 앞에 장착된 조리개는 빔스플리터에서 반사되는 입사광을 차단하기 위해서 사용된다.

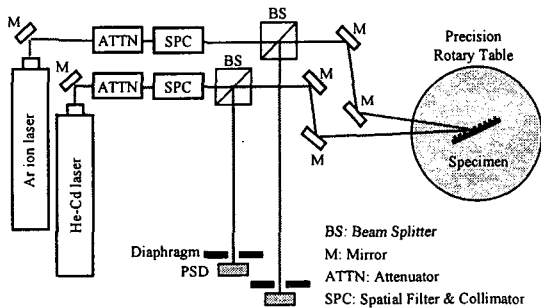


Fig. 1 Schematic diagram of the optical diffractometer using Ar ion and He-Cd laser

### 3. 격자 피치 표준 시편 측정

#### 3.1 격자 피치 표준 시편

격자 피치 표준 시편은 시편의 표면에 1 차원 또는 2 차원 격자 형태로 반복되는 미소 구조물을 갖고 있다. 미소 구조물의 분포 형태에 따라 1 차원 또는 2 차원 격자 피치 표준 시편으로 구분된다 (Fig. 2). 격자 피치 표준 시편에서는 구조물들의 형상과 구조물 간의 거리가 매우 높은 균일도를 갖기 때문에 이를 길이 측정의 표준 시편으로 이용할 수 있다.

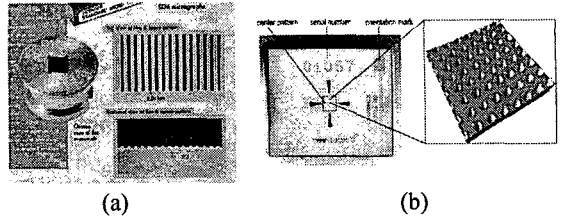


Fig. 2 Examples of grating pitch standards; (a) 1D grating (Hitachi); (b) 2D grating (Nanosensors)

#### 3.2 측정 항목

격자 피치 표준 시편의 측정 항목 (measurand)은 1 차원 격자 피치 시편의 경우 Fig. 3(a)와 같이 한 방향의 평균 피치 값이 되고, 2 차원 격자 피치 시편의 경우에는 Fig. 3(b)와 같이 x 축과 y 축 방향의 평균 피치 값과 함께 피치 방향간의 직교도를 측정한다.

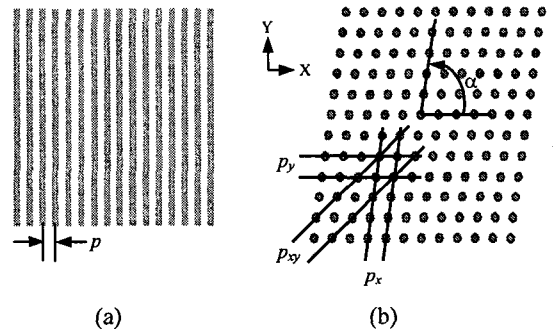


Fig. 3 Measurands in the measurements of grating pitch standards; (a) 1D grating ( $p$ : mean pitch); (b) 2D grating ( $p_x$ : mean pitch in x-axis direction,  $p_y$ : mean pitch in y-axis direction,  $\alpha$ : orthogonality)

측정에 사용된 광 회절계는 Littrow 구성을 적용하였기 때문에, 식 (1)로부터 평균 피치 값은 사용된 레이저 광원의 파장 값과 측정된 회절각 등을 이용하여 식 (2)와 같이 계산된다.

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

위 식에서  $p$  는 평균 피치 값,  $m$  은 회절광 차수,  $\lambda$  는 레이저 파장,  $\theta_d$  는 회절각,  $\theta_i$  는 입사각,  $\alpha$  는 시편 열팽창계수,  $t$  는 시편 온도를 각각 나타낸

다. 회절각은 기구적인 오차 요인을 최소화하기 위해 양의 방향과 음의 방향 회절각의 평균 값을 이용하며, 빔스플리터면에서 반사된 빔이 4 분할 포토다이오드에 입사되지 않도록 입사각을 0.05°로 설정하였다.

광 회절계를 이용하면 측정에 사용된 레이저 광원 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 차원 격자 피치 시편의 직교도 측정을 위해서 x 축과 y 축 방향의 평균 피치 값과 함께 대각 방향의 평균 피치 값을 추가적으로 측정하여야 한다. 측정된 각 방향의 평균 피치 값을 코사인 제 2 법칙에 적용하면, x 축 방향 피치 라인과 y 축 방향 피치 라인의 평균 사잇각인 직교도는 식 (3)과 같이 계산될 수 있다.

$$\alpha = \pi - \cos^{-1} \left( \frac{p_x}{2 \cdot p_y} + \frac{p_y}{2 \cdot p_x} - \frac{2 \cdot p_x \cdot p_y}{p_{xy}^2} \right) \quad (3)$$

위 식에서  $\alpha$ 는 시편의 직교도  $p_x, p_y, p_{xy}$ 는 x 축, y 축, 대각 방향의 평균 피치 값을 각각 나타낸다.

### 3.3 측정 방법

격자 피치 표준 시편의 측정을 위해서 광원에서 발생하는 입사광과 시편을 정렬한 뒤, 각 차수별 회절각과 측정 중의 환경 데이터를 획득하여 각 측정 항목 값과 측정불확도를 계산한다. 2 차원 격자 피치 시편의 측정 과정에서는 직교도 계산을 위한 대각 방향의 평균 피치 값을 포함하여 3 방향의 평균 피치 값이 각각 측정되어야 하는데, 각 방향 평균 피치 값 측정 과정에서는 아래에 서술된 측정 방법이 동일하게 적용된다.

#### 3.3.1 입사광 정렬

한 쌍의 tilt mirror 를 조절하여 레이저 광원에서 발생하는 입사광이 정밀 회전 원판의 중심을 지나고 정밀 회전 원판의 회전 평면과 평행하도록 정렬한다.

#### 3.3.2 시편 장착

정밀 회전 원판에 설치된 시편 고정부에 시편

을 장착한다. 시편에서 발생하는 회절광을 관찰하면서 회절광의 진행 방향이 정밀 회전 원판의 회전 평면과 평행해지도록, 시편의 회전각을 조절한다.

#### 3.3.3 입사각과 포토다이오드 위치 설정

정밀 회전 원판의 회전각과 시편의 기울어짐을 조절하여 0 차 회절광이 입사광과 일치되도록 정렬한다. 설정된 입사각인 0.05° 만큼 정밀 회전 원판을 회전시켜, 빔스플리터에서 반사된 빔이 포토다이오드에 들어가지 않도록 한다. 이 때 0 차 회절광이 4 분할 포토다이오드의 중심과 일치하도록 포토다이오드의 위치를 조절한다.

#### 3.3.4 시편 정렬

정밀 회전 원판을 회전시켰을 때 모든 차수의 회절광이 포토다이오드의 중심을 지나도록 시편의 기울어짐과 회전각을 조절한다. 시편의 중심이 입사광과 일치하고 시편 면이 정밀 회전 원판의 회전 중심에 위치하도록 시편의 위치를 조절한다. 이와 같은 조건이 동시에 만족될 수 있도록 정렬 과정을 반복 수행한다.

#### 3.3.5 회절각 측정

정밀 회전 원판을 회전시키면서, 각 차수의 회절광이 포토다이오드의 중심과 일치될 때의 회전각을 기록한다. 공기 중의 온도, 압력, 습도를 측정하고 시편의 온도 변화도 기록한다.

#### 3.3.6 측정 항목 값 계산

3.3.5 과정에서 얻어진 측정 데이터를 이용하여 레이저 광원의 파장을 보정하고 식 (2)를 이용하여 평균 피치 값을 계산한다. 2 차원 격자 피치 시편의 측정의 경우에는 측정하고자 하는 각 피치 방향에 대하여 3.3.2 ~ 3.3.5 과정을 반복하고, 구해진 각 방향 평균 피치 값을 식 (3)에 대입하여 시편의 직교도를 계산한다.

## 4. 불확도 해석

### 4.1 격자 피치 측정 불확도

격자 피치 측정 불확도 해석을 위해서 측정불확도 표현 지침<sup>10</sup>을 적용한다. 식 (2)를 수학적 모델로 하여 불확도 전파 법칙을 적용하면 격자 피

치  $p$  의 합성 표준불확도  $u_c(p)$  는 식 (4) 와 같이 감도계수와 각 불확도 요인의 표준불확도 크기를 이용하여 나타낼 수 있다. 각 표준불확도의 크기는 아래에 서술한 것과 같이 구해진다.

$$u_c^2(p) = \left(\frac{p}{\lambda}\right)^2 \cdot u^2(\lambda) + \left(\frac{p}{\tan \theta_d}\right)^2 \cdot u^2(\theta_d) + (p \cdot \tan \theta_i)^2 \cdot u^2(\theta_i) + [p \cdot (t - 20)]^2 \cdot u^2(\alpha_m) + (p \cdot \alpha_m)^2 \cdot u^2(t) \quad (4)$$

#### 4.1.1 레이저 광원 파장 불확도 $u(\lambda)$

레이저 광원의 파장 불확도는 식 (5) 와 같이 진공 파장 불확도  $u(\lambda_v)$ , 파장 안정도  $u(\lambda_s)$ , 공기 굴절률 보정 오차  $u(\lambda_r)$  로 구성된다.

$$u(\lambda) = \sqrt{u^2(\lambda_v) + u^2(\lambda_s) + u^2(\lambda_r)} \quad (5)$$

각 레이저 광원이 갖는 불확도 값은 Table 1 과 같다. 진공 파장 불확도는 참고 문헌<sup>11,12</sup>, 파장 안정도는 명세서를 각각 인용하였고, 공기 굴절률 보정 오차는 공기 중의 온도, 압력, 상대 습도를 측정하는 시스템의 성능을 고려하여 산정하였는데, 각 측정 항목이 갖는 불확도는 각각 0.5 °C, 1 mbar, 그리고 1%이다.

Table 1 Standard uncertainty in the wavelength of the Ar ion and He-Cd laser source

	Ar ion (ppm)	He-Cd (ppm)
$u(\lambda_v)$	9.2	15.4
$u(\lambda_s)$	1.0	3.1
$u(\lambda_r)$	1.0	

#### 4.1.2 회절각 측정 불확도 $u(\theta_d)$

회절각 측정 불확도는 식 (6) 과 같이 회절각 측정 반복도  $u(\theta_{dr})$ , 회절 차수에 따른 피치 측정 값 변화에서 기인된 회절각 측정 불확도  $u(\theta_{dm})$ , 정밀 회전 원판의 회절각 측정 불확도  $u(\theta_{da})$  로 구성된다.

$$u(\theta_d) = \sqrt{u^2(\theta_{dr}) + u^2(\theta_{dm}) + u^2(\theta_{da})} \quad (6)$$

$u(\theta_{dr})$  은 동일한 측정 조건에서 얻어진 회절각

반복 측정 값들의 표준편차로부터 구해진다.  $u(\theta_{dm})$  는 여러 개의 회절 차수를 얻을 수 있는 경우에는 회절 차수에 따른 피치 측정 값의 변화를 이용하여 구할 수 있지만, 한 개의 회절 차수만을 얻을 수 있는 경우에는 다른 측정의 결과를 인용하여야 한다.  $u(\theta_{da})$  는 각도눈금 원판 (indexing table) 과 자동시준기를 이용하여 교정된 정밀 회전 원판 출력 값의 교정 불확도 값  $1.45 \times 10^{-6}$  rad 을 이용한다.

#### 4.1.3 입사각 측정 불확도 $u(\theta_i)$

광 회절계 구성에서 설정된 입사각은 0.05° 이고, 입사각의 표준불확도는 반치폭이 0.01° 인 직사각형 분포로 산정하였다.

#### 4.1.4 시편 열팽창 계수 불확도 $u(\alpha_m)$

시편 열팽창 계수의 표준불확도 값으로, 인용된 계수 값이 갖는 표준불확도를 적용한다. 일반적인 격자 피치 표준 시편의 재료로 사용되는 이산화규소의 열팽창 계수는  $2.55 \times 10^{-6}$  /°C 이고, 계수 값의 표준불확도는 반치폭이  $1.0 \times 10^{-6}$  /°C 인 직사각형 분포로 산정하였다.

#### 4.1.5 시편 온도 측정 불확도 $u(t)$

시편의 온도 측정 과정에서 발생하는 표준불확도 값으로, 온도 측정기의 교정 성적서에 명기된 표준불확도인 0.5 °C 를 적용하였다.

### 4.2 직교도 측정 불확도

직교도 측정 불확도 해석의 경우에도 식 (3) 을 수학적 모델로 설정하고 불확도 전파 법칙을 적용하여 식 (7) 과 같이 합성 표준불확도를 계산할 수 있다.

$$u_c^2(\alpha) = \left(\frac{\partial \alpha}{\partial p_x}\right)^2 \cdot u^2(p_x) + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial p_y}\right)^2 \cdot u^2(p_y) + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial p_{xy}}\right)^2 \cdot u^2(p_{xy}) \quad (7)$$

직교도는 식 (3) 과 같이 각 방향 격자 피치 값으로부터 구해지기 때문에, 각 방향 피치 값의 측정 불확도가 직교도 측정의 불확도 요인이 된다. 따라서 각 방향 격자 피치 값을 이용하여 계산되

는 민감도 계수 값과 식 (4)를 이용하여 계산된 각 방향 격자 피치의 측정불확도 값을 식 (7)에 대입하면 직교도의 합성 표준불확도 값을 얻을 수 있다.

### 5. 측정 실험

#### 5.1 실험 방법 및 결과

광 회절계를 이용한 측정 실험에 사용된 시편은 2 차원 격자 피치 표준 시편인 2D300 (Advanced Surface Microscopy)과 2D1000 (Nanosensors)이다. 각 표준 시편의 명목 평균 피치 값은 300 nm, 1000 nm 이고, 직교도의 명목 값은 90° 이다.

각 시편에 대하여 3.3 절에서 서술된 측정 방법을 적용하여 각 방향의 평균 피치와 직교도를 측정하였다. 2D300 격자 피치 시편의 측정에서는 두 개의 광원을 모두 이용하였고, 2D1000 격자 피치 시편의 측정에서는 시편 정렬의 어려움으로 인하여 Ar ion 레이저만을 이용하였다.

2D300 시편의 측정에서는 1 차 회절광 만을 이용할 수 있고, 2D1000 시편의 경우에는 Ar ion 레이저 적용 시 3 차 회절광까지 이용이 가능한데, 최종적인 격자 피치 값은 각 차수 회절광을 이용한 측정 값의 평균 값으로 하였다. 격자 피치 측정의 반복도를 평가하기 위해 광원과 시편 정렬을 5~7 회 새로이 조절하면서 측정하였고, 동일한 정렬 상태에서 3 회 반복 측정을 수행하여 측정 값 변화를 관찰하였다.

Fig. 4 는 각 격자 피치 시편의 측정 횟수에 따른 x 축 방향 피치 측정 값 변화를 나타낸 것이다. 2D300 시편의 경우에는 Ar ion 레이저와 He-Cd 레이저를 이용한 측정 결과를 나타내었고, 전체 측정 값의 평균 값과 합성 표준불확도 범위를 함께 나타내었다. 2D1000 시편의 경우에는 Ar ion 레이저를 이용한 측정 결과인데, 각 차수의 회절광을 이용하여 얻어진 측정 결과를 각각 나타내었다. 일반적으로 동일한 시편 정렬 상태의 반복 측정 값 변화보다 광원과 시편의 새로운 정렬에 따른 측정 값 변화가 더 크게 나타난다. 특히 2D300 의 경우에는 반복 측정에 따른 측정 값 편차가 작기 때문에 그러한 경향으로 두드러져 보인다.

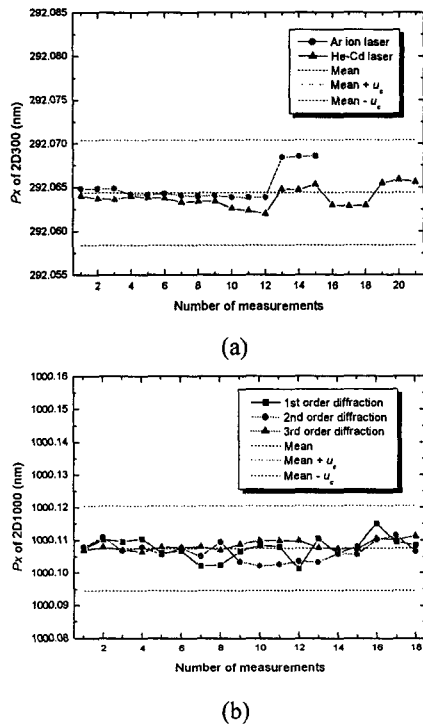


Fig. 4 Variation of measured pitch values according to the number of measurements; (a)  $p_x$  of 2D300; (b)  $p_x$  of 2D1000

Table 2 와 3 은 2D300 과 2D1000 시편의 측정 결과와 확장 불확도 값을 함께 나타낸 것이다. 확장 불확도 값은 식 (4)와 (7)을 이용하여 계산된 합성 표준불확도 값에 포함인자 (coverage factor,  $k = 2$ )를 곱한 것으로, 불확도 분포를 정규분포라 가정하여 포함인자 값을 산정하였고 신뢰 구간은 약 95%이다.

Table 2 Measurement results of 2D300 (Measured value and expanded uncertainty)

	Measured value	Expanded Uncertainty ( $k = 2$ )
$p_x$	292.064 nm	0.012 nm
$p_y$	292.078 nm	0.013 nm
$\alpha$	90.5453°	0.0056°

Table 3 Measurement results of 2D1000 (Measured value and expanded uncertainty)

	Measured value	Expanded Uncertainty ( $k=2$ )
$p_x$	1000.108 nm	0.026 nm
$p_y$	999.923 nm	0.026 nm
$\alpha$	90.0106°	0.0036°

측정 결과에서 보면 광 회절계를 이용하여 측정된 격자 피치 값이 갖는 확장 불확도 값은 수십 pm 수준이고, 상대 불확도로 환산해 보면 0.004 % 이하가 된다. 직교도 측정의 불확도를 보면 2D1000 에 비해 2D300 의 경우가 조금 더 큰 불확도를 갖는다.

### 5.2 불확도 평가

광 회절계를 이용한 격자 피치 측정의 불확도는 4.1 절에서 서술한 것과 같이 레이저 광원의 파장 불확도, 회절각 측정 불확도 등 여러 가지 요인에서 기인된다. Fig. 5 는 x 축 방향 평균 피치 값 측정 시에 발생하는 각 불확도 요인의 기여량을 나타낸 것이다.

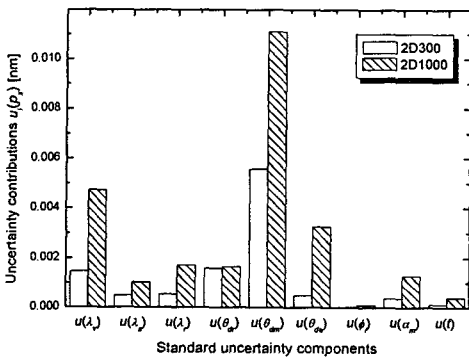


Fig. 5 Uncertainty contributions of each standard uncertainty component in the measurements of  $p_x$

결과에서 보면 여러 가지 불확도 요인 중 회절 차수에 따른 피치 측정 값 변화에서 기인된 불확도 기여량이 가장 큰 값을 갖는다. 이러한 불확도의 원인은 아직 명확히 규명되어 있지는 않지만, 시편 고정 시에 발생하는 시편 면의 변형이 주요

한 요인으로 제기되고 있다.<sup>4</sup> 격자 피치 측정 불확도를 감소시키거나 보다 엄밀한 불확도 값 산정을 위해서는 회절 차수에 따른 격자 피치 측정 값 변화에 대한 추가적인 연구가 필요할 것이다. 식 (4)에 나타난 것과 같이 각 민감도 계수 값은 격자 피치 값에 비례한다. 따라서 실험적으로 구한 회절각 측정 반복도를 제외한 각 불확도 요인의 기여량은 격자 피치 값의 크기와 거의 비례하여 증가 된다.

직교도 측정에서는 4.2 절에서 설명한 것과 같이 각 방향 피치 측정 불확도가 주요 불확도 요인이 된다 (Fig. 6). 그런데 각 불확도 요인의 기여량은 각 방향 피치 측정의 상대 불확도와 직접적으로 비례한다. 따라서 2D300 의 경우가 2D1000 에 비해 더 작은 피치 측정 불확도 값을 갖지만, 상대 불확도 값은 더 크기 때문에 각 불확도 요인의 기여량은 더 크게 나타난다.

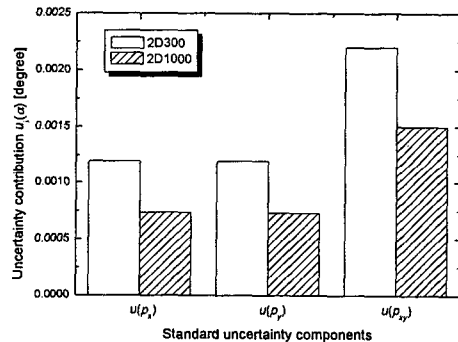


Fig. 6 Uncertainty contributions of each standard uncertainty component in the measurements of  $\alpha$

### 6. 결론

본 연구에서는 광 회절계를 이용하여 격자 피치 표준 시편을 측정하고 측정 불확도를 해석하였다. Ar ion, He-Cd 레이저 광원과 정밀 회절 원판을 이용하여 Littrow 방식의 광 회절계를 구성하였고, 불확도 해석을 통하여 격자 피치 시편 측정에 관련된 불확도 요인을 분석하였다. 명목 피치 값이 300 nm, 1000 nm 인 2 차원 격자 피치 시편을 측정하고 측정 결과와 함께 각 표준불확도 성분 및 확장불확도 값을 제시하였다. 각 격자 시편의 피치

측정 값이 갖는 확장불확도 ( $k = 2$ )는 각각 0.015 nm 와 0.03 nm 수준이고 직교도의 경우에는 0.006° 이하의 불확도 값을 갖는다.

피치 측정의 불확도 해석 결과에서 보면 여러 가지 표준불확도 성분 중 회절 차수에 따른 측정 값 변화가 가장 주요한 불확도 요인으로 나타났다. 측정 실험 결과를 통하여 광 회절계가 격자 피치 표준 시편 측정에 효과적인 측정 방법으로 적용될 수 있음을 알 수 있다.

### 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. 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.
3. 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.
4. Meli, F., Thalman, R. and Blattner, P., "High precision pitch calibration of gratings using laser diffractometry," 1<sup>st</sup> international conference and general meeting of the euspen society for precision engineering and nanometrology, pp. 252-255, 1999.
5. Meli, F. and Thalman, R., "Long-range AFM profiler used for accurate pitch measurements," Measurement Science and Technology, Vol. 9, pp. 1087-1092, 1998.
6. 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.
7. 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.
8. Korotkov, V. I., Pulkin, S. A., Vitushkin, A. L. and Vitushkin, L. F., "Laser interferometric diffractometry for measurements of diffraction grating spacing," Applied Optics, Vol. 35, pp. 4782-4786, 1996.
9. Vitushkin, L. F., Zeilikovich, I. S., Korotkov, V. I. and Pulkin, S. A., "High-precision measurements of the groove spacing of diffraction grating using the interference diffractometer and study of the quality of diffraction gratings," Optics and Spectroscopy, Vol. 77, pp. 129-135, 1994.
10. ISO, "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement," 1993.
11. Marvin, J. W., "Handbook of Laser Wavelengths," 1993.
12. National Astronomical Observatory, "Chronological Scientific Tables," 1988.