

## 노광 광학계의 왜곡수차 측정에 관한 연구

주원돈<sup>1†</sup> · 이지훈<sup>2</sup> · 채성민<sup>2</sup> · 김혜정<sup>2</sup> · 정미숙<sup>2</sup>

<sup>1</sup>삼성전자(주)

Ⓞ 443-742 경기도 수원시 영통구 매탄3동 314

<sup>2</sup>한국산업기술대학교 나노-광공학과

Ⓞ 429-793 경기도 시흥시 산기대학로 237

(2012년 5월 2일 받음, 2012년 6월 7일 수정본 받음, 2012년 6월 8일 게재 확정)

일반적으로 왜곡을 측정하는 방법으로 패턴의 전체 이미지를 분석하여 왜곡을 평가하는 방법을 이용하고 있으나 정확도가 높지 않아 카메라 등의 광학계에 많이 적용되고 있다. 1 $\mu$ m이하의 정확도를 요구하는 왜곡수차를 측정하는 방법으로는 고가의 정밀 스테이지를 이용하여 마스크의 이미지 위치를 정확히 측정하는 방법이 주로 이용된다. 본 논문에서는 정확도가 요구되지 않는 매뉴얼 스테이지를 이용하여 왜곡을 정확히 측정하는 방법을 연구 하였다. 주요 아이디어로는 CCD나 CMOS를 이용하여 마스크 이미지를 일부 중첩되도록 분할측정하고 인접중첩영역의 이미지를 통합하여 마스크 이미지 위치를 정확히 계산하는 것이다. 마스크 이미지의 정확한 위치정보를 얻기 위해 Canny Edge Detection 기법을 사용하였으며 이렇게 확보된 위치정보로부터 좌표변환과 최소자승법을 사용하여 정확한 왜곡수차를 계산하는 과정을 연구하였다.

## Direct Measurement of Distortion of Optical System of Lithography

WonDon Joo<sup>1†</sup>, JiHoon Lee<sup>2</sup>, SungMin Chae<sup>2</sup>, Hye Jung Kim<sup>2</sup>, and Mee Suk Jung<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samsung Electronics, 416 Maetan-3 dong, Yeongtong-gu, Suwon 443-742, Korea

<sup>2</sup>Department of Nano-Optical Engineering, Korea Polytechnic University, Jeongwang-dong, Siheung 429-793, Korea

(Received May 2, 2012; Revised manuscript June 7, 2012; Accepted June 8, 2012)

In general, one of the methods used to measure distortion is to use the full image of the regular pattern. However, because of low accuracy, this method is mainly used for an optical system such as a camera. In order to measure distortion with high accuracy less than 1 $\mu$ m, one can use the method of measuring the exact position of a mask image. In this case, a high accuracy stage with a laser encoder is required. In this paper, we investigate measurement of the distortion of high accuracy with a simple manual stage. The main idea is that we split and measure the mask image with the overlapping area by using CCD or CMOS, and then we get an exact position of the mask image by integrating the adjacent split images. We use the Canny Edge Detection method to get the position information of the mask image and we researched the process to exactly calculate distortion by using coordinate transformations and a least square method.

Keywords: Optical metrology, Distortion measurement, Lithography optical system, Aberration measurement of optical system  
OCIS codes: (080.0080)Geometric optics; (120.0120)Instrumentation, measurement, and metrology

### I. 서 론

최근 노광장치의 국산화에 따라 노광 광학계에 대한 개발의 필요성이 증가하고 있다. 노광장치에서 광학계는 마스크의 패턴을 웨이퍼에 정해진 배율로 노광을 통해 전사시키는 역할을 한다. 노광 광학계의 중요한 특징은 마스크 패턴을 기관에 고해상도로 결상시킴이 요구 될 뿐아니라 마스크패

턴을 왜곡없이 기관에 형성함이 매우 중요하다. 따라서 광학계의 왜곡의 측정 방법에 대한 연구는 매우 중요하다고 생각된다. 일반적으로 왜곡수차측정<sup>1), 2)</sup>은 실제 노광을 통해 진행되며 레이저엔코더를 이용한 고성능의 스테이지가 결합된 현미경을 통해 왜곡수차측정을 진행한다. 이러한 방식은 실시간으로 왜곡 측정을 할 수 없다는 단점을 가지고 있으며, 수 차례 노광을 통해 왜곡수차를 측정하고 분석을 통하여 왜

<sup>†</sup>E-mail: wdoptic@naver.com

곡을 줄여 나가야 하므로 측정에 많은 비용이 들어가게 된다. 이러한 방식은 비용적인 측면이나 시간적인 측면에서 비효율적인 방식이라 볼 수 있다. 실시간으로 왜곡을 측정하는 방법으로 레이저엔코더를 이용한 스테이지를 이용하여 마스크의 규칙적인 패턴의 위치를 정확히 측정하는 방법이 있다. 그러나 이러한 경우 스테이지의 성능 및 주변 환경 조건이 매우 중요하고 측정장비를 갖추기 위해서는 많은 비용이 요구된다. 따라서 노광을 하지 않고 저비용으로 간단하게 측정을 할 수 있는 측정 시스템이 필요하다고 판단하여 연구를 진행하게 되었다. 이러한 연구는 노광 광학계 외에도 다양한 분야, 예를 들어 카메라, 검사장비, CCTV 등에서 왜곡수차의 보정<sup>3, 4</sup>에 이용될 수 있을 것이라고 판단된다.

본 논문에서는 왜곡수차 측정방법 및 관련이론을 기술하고 이러한 결과를 노광광학계에 적용하여 왜곡측정에 타당성이 있음을 확인하였다.

## II. 왜곡수차의 정의

왜곡수차의 파면함수는 식 (1)과 같이 표현된다. 이 식은 자이델수차급수 중 왜곡수차<sup>5, 6</sup>에 관한 부분만을 가져온 것이다.

그림 1에서 좌표  $X_p, Y_p$ 는 정규화된 Pupil Coordinate이며  $\rho$ 와  $\theta$ 는 극좌표계를 표현한다.

$$W(\rho, \theta, H) = W_{311}H^3\rho\cos\theta = W_{311}H^3y_p \quad (1)$$

여기서  $W_{311}$ 은 왜곡에 대한 3차 파면수차의 계수를 나타내며  $H$ 는 물체의 크기를 나타낸다. 식 (1)의 의미를 살펴보면 파면수차의 Tilt가 물체의 크기에 따라 다름을 나타낸다.

이는 상점이 흐려지는 것이 아니라 단순히 상점의 변위에 의해서 일어나는 현상임을 분명히 해야 한다. 상면 전체에 걸쳐서 일어난 시야(Field)에 따른 축척의 변화라고 할 수 있다.

비축(off axis)에 위치한 물체점에 대한 상이 근축식에 의해 형성된 이상적인 상의 위치보다 광축에서 멀거나 가까울

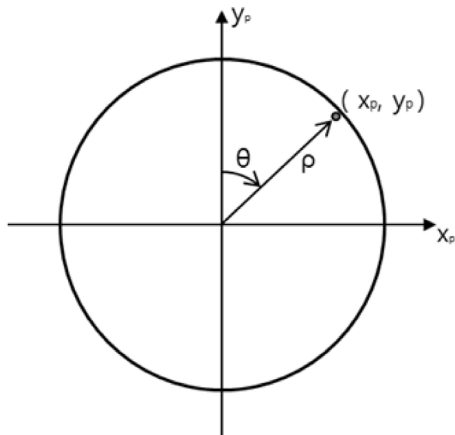


FIG. 1. Normalized Pupil Coordinate

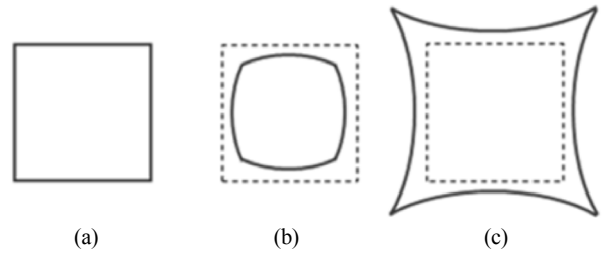


FIG. 2. Distortion (a) Object (b) Barrel distortion (c) Pincushion distortion.

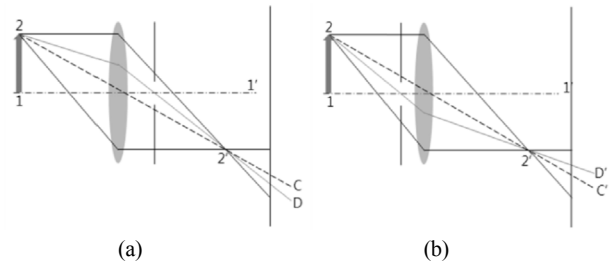


FIG. 3. Distortion type according to stop position (a) Barrel distortion - Stop located at right side of lens (b) Pincushion distortion - Stop located at left side of lens.

경우에 상이 확대 또는 축소되는 영향을 받는데 이를 왜곡수차(distortion)에 의한 것이라고 말한다. 즉, 왜곡수차는 근축광선에 의한 상과 실제 상의 위치차이를 의미한다. 일반적으로 왜곡수차는 상의 크기가 커지면 그 크기의 세제곱에 비례하여 증가한다. 따라서 왜곡수차의 영향을 받는 광학계가 중심이 광축에 놓여있는 정사각형의 물체를 결상시킨다면 상의 모서리들은 변들에 대한 상보다 더욱 많이 변형이 될 것이다.

그림 2는 왜곡수차의 종류에 관한 삽화이다. (a)는 왜곡이 없는 정방형의 물체를 나타내며 (b)는 (a)와 같은 물체를 결상시켰을 때 일어난 Barrel Distortion이라고 하여 전체적인 상의 넓이는 본래 배율보다는 적어지며 전체적으로 볼록한 형태를 지니고 있다. (c)는 Pincushion Distortion이라고 하여 전체적인 상의 넓이는 원래 배율보다 증가하나 전체적으로 오목한 형태를 지니게 된다.

광학계의 왜곡수차는 Stop의 위치에 따라서 그 분류가 달라질 수가 있는데 그림 3에서 (a)는 광학계 뒤에 Stop이 위치하게 되는 경우 Barrel Distortion이 나타남을 보여준다. 그리고 (b)는 광학계 앞에 Stop을 위치시켰을 경우 Pincushion Distortion이 형성됨을 보여준다. 이러한 사실로부터 Stop이 광학계의 중앙에 위치하게 된다면 왜곡이 없는 상을 맺게 된다는 것을 알 수 있다.

## III. 왜곡수차 측정 방법

본 연구의 왜곡수차측정은 광학계에 규칙적인 패턴<sup>7</sup>의 일부를 반복적으로 CCD나 CMOS에 결상시켜 분석을 진행한다.

마스크패턴의 종류에는 기본적으로 사각형, 원형, 십자무늬 등이 있으며 결상된 상에서 패턴의 중심지점을 찾기 용이한 형태를 사용하면 된다. 본 논문에서는 원형패턴보다 Edge 부분의 정밀한 검출이 가능한 사각패턴을 이용하였다. 원형패턴은 상하좌우의 정점이 각각 1개지만 사각형의 경우 한 면이 정점의 역할을 하기 때문에 정밀도를 상승시킬 수 있다. 본 논문에 사용하게 될 사각 패턴들은 물체 영역에 규칙적으로 배열시켜 그림 4와 같이 만든다. 그리고 패턴은 측정 대상이 되는 광학계의 해상도보다 더 큰 패턴을 사용하여 측정을 진행한다. 이는 광학계의 해상도보다 작은 패턴은 그상이 선명하지 않아 패턴의 중심을 찾기가 어렵기 때문이다.

일반적으로 광학계의 상의 크기가 CCD 크기보다 크므로 상을 부분적으로 중첩을 하여 하나의 이미지로 결합하여 패턴 전체의 정확한 상을 얻는다. 우선 그림 4와 같이 일정한 패턴을 광학계를 통하여 결상시켜 일부분의 영상을 획득한다. 그리고 그림 5와 같이 처음 얻은 패턴 중 일부분의 패턴이 중첩되도록 검출기를 이동시켜 인접 영상을 획득한다.

각각의 이미지에는  $n \times n$ 의 사각패턴이 들어있는데 각각의 사각형 패턴들은 적정 임계치를 사용하여 노이즈를 제거한 후 Canny Edge Detection<sup>[8]</sup> (C.E.D.)방식을 이용하여 사각패턴의 경계를 검출한다. 여기서 C.E.D.는 패턴의 Edge를 검출하는 algorithm이다. 패턴을 중첩시킬 때, 중첩되는 패턴의

갯수가 그림 5에서는  $n$  by 1이지만 이 수를  $n$  by 2 또는 그 이상으로 증가시켜 중첩시키면 이미지의 결합 오류를 줄이는데 기여할 수 있다.  $n$ 은 검출기의 크기에 따라 가능한 한 큰 값으로 선택한다.

이렇게 검출된 각 사각패턴들의 경계로부터 각 중심좌표를 계산하고 이를 각 패턴의 고유 좌표로 선택한다.

왜곡수차를 계산하기 위해서는 각 부분 영상의 지역좌표들을 통합하여 전역좌표로 이동시켜야 한다. 이를 위해서는 중첩되는 패턴의 좌표들을 이용하여 하나의 좌표계로 통합하는 과정이 필요하다. 영상에서 얻어진 각 패턴 중심좌표를  $P_{min}^{\#}(x, y)$ 로 기술하자. 첨자 #은 영상의 번호,  $m$ 은 좌표의 가로 순서,  $n$ 은 좌표의 세로순서를 나타낸다.

우선 두 인접 이미지를 하나의 좌표로 통합하는 과정으로 먼저 그림 7의 a이미지의 우측상단의 좌표를 b이미지의 좌측상단좌표와 일치시킨다. 이 경우 a와 b이미지에서 각각 우측과 좌측 상단의 좌표를 제외하고 나머지 점들의 좌표는 일치하지 않을 것이다. 두 이미지의 중첩영역의 모든 점들의 일치를 극대화하기 위하여 두 이미지의 중첩점들의 불일치 값들의 RMS가 최소가 되도록 b이미지를 병진 및 회전시킨다. 이를 수식으로 정리하면 다음과 같다. b이미지를 a좌표계로 옮기는 식은 식 (2)와 같이 정의한다. 이는 a이미지의 우측 최상단의 좌표 f행 g열에 있는 좌표  $P_{fg}^a(x, y)$ 에 b이미지의 f행 h열의 좌표  $P_{fh}^b(x, y)$ 를 일치시켜 b이미지의 모든 좌표들을 a이미지의 좌표계로 변환함으로써 얻어진다.

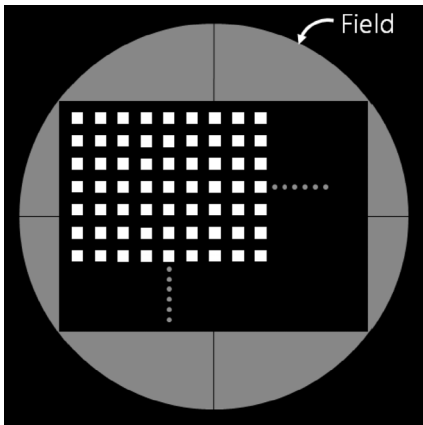


FIG. 4. Mask pattern with rectangular cells (reference pattern to measure distortion).

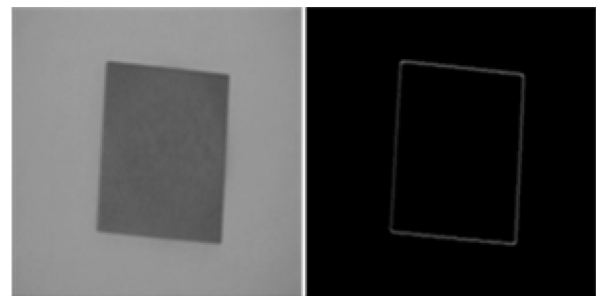


FIG. 6. Canny edge detection sample.

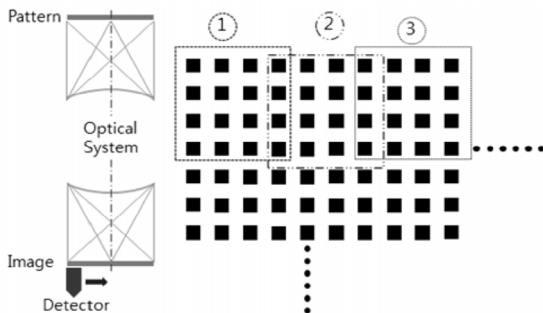


FIG. 5. The process of detection with overlap area.

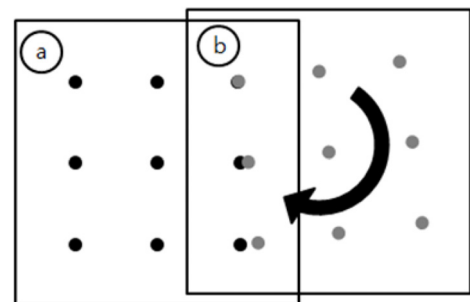


FIG. 7. The process of overlap to coincide with adjacent patterns.

$$P_{mn}^B(x,y) = P_{fg}^a(x,y) + (P_{mn}^b(x,y) - P_{fh}^b(x,y)) \quad (2)$$

$$\begin{cases} m = 1, 2, 3, \dots, j \\ n = 1, 2, 3, \dots, k \end{cases}$$

여기서  $P_{fg}^a(x, y)$ 는 a 이미지 좌표 원점에 대해 f행 g열에 있는 점의 좌표값을 나타내고,  $P_{fh}^b(x, y)$ 는 b 이미지 좌표 원점에 대해 f행 h열에 있는 점의 좌표값을 나타내며  $P_{mn}^B(x, y)$ 는 a 이미지 좌표 원점을 기준으로 b 이미지 점들의 좌표값을 나타낸다. 그리고 j와 k는 검출기에 의해 얻어진 한 이미지에서 패턴의 행과 열의 갯수이다.

다음으로 b이미지를 회전시킬 때 사용할 회전벡터는 R로 정의하며 식 (3)과 같이 정의한다.

$$R(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (3)$$

그 다음으로 두 인접 이미지에 모든 중첩 점들의 일치를 최대화 하기 위해서 식 (5)와 같이 두 점들의 위치 차이의 RMS가 최소가 되도록 b이미지의 좌표들을 x축으로  $\Delta S_x$ 만큼, y축으로  $\Delta S_y$ 만큼 이동과  $\phi$ 만큼 회전을 시킨다.

$$P_{mn}^b(x,y) = P_{mn}^B(x + \Delta S_x, y + \Delta S_y) * R(\phi) \quad (4)$$

$$\begin{cases} m = 1, 2, 3, \dots, j \\ n = 1, 2, 3, \dots, k \end{cases}$$

여기서  $P_{mn}^b(x, y)$ 는 두 인접 이미지의 중첩 점들이 최대한 일치 되었을 때 a 이미지 원점을 기준으로 b 이미지 점들의 좌표값을 나타낸다.

$$RMS = \sum_{m=1n=1}^{X_0 Y_0} \frac{\sqrt{(P_{(V-y+m)(H-z+n)}^a - P_{mn}^b)^2}}{X_0 Y_0} \quad (5)$$

$$\begin{cases} m = 1, 2, 3, \dots, X_0 \\ n = 1, 2, 3, \dots, Y_0 \end{cases}$$

식 (5)에서 V는 a이미지의 총행의 갯수, H는 a이미지의 총 열의 갯수,  $X_0$ 는 중첩되는 좌표의 행의 갯수, 그리고  $Y_0$ 는 중첩되는 좌표의 열의 갯수를 나타낸다. 여기서  $(P_{(V-y+m)(H-z+n)}^a - P_{mn}^b)^2$ 는  $P_{(V-y+m)(H-z+n)}^a$ 와  $P_{mn}^b$ 의 각각 x성분과 y성분의 좌표

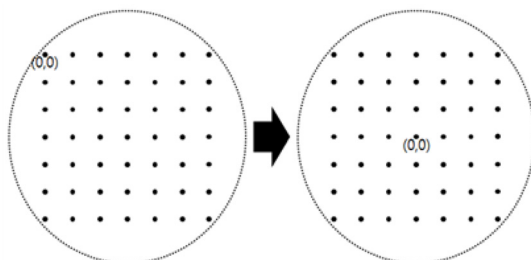


FIG. 8. Linear transformation of measurement data.

값을  $(x_{mn}, y_{mn}), (x'_{mn}, y'_{mn})$ 이라하면  $(x_{mn}-x'_{mn})^2 + (y_{mn}-y'_{mn})^2$ 을 나타낸다.

즉,  $P_{mn}^b(x, y)$  좌표는 식 (5)와 같이 정의된 RMS가 최소가 되는  $\Delta S_x, \Delta S_y, \phi$ 의 값에 의하여 a 이미지 좌표 원점에 대한 b 이미지의 최종 좌표가 된다.

지금까지 이미지의 중첩에 관하여 설명하였으며 이제 모든 각 이미지의 좌표들이 하나의 좌표계로 옮겨짐으로 인해  $P_{mn}^b(x, y)$ 로 기술하던 좌표표기를  $P'_{mn}(x, y)$ 으로 변경한다.

왜곡수차가 광축을 기준으로 계산되므로 측정좌표의 중심이 (0,0)가 되도록 전체적으로 선형 이동시키고자 한다. 식 (6)은 그 과정을 식으로 정의한 것이다.  $P'_{center}$ 는  $P'_{mn}$ 좌표들 중 중심이 되는 좌표를 의미한다.

$$P_{mn} = P'_{mn} - P'_{center} \quad \begin{cases} m = 1, 2, 3, \dots, J \\ n = 1, 2, 3, \dots, K \end{cases} \quad (6)$$

여기서  $P_{mn}$ 은 전 이미지의 중심을 원점으로 하여 측정된 패턴들의 좌표값을 나타내고, J와 K는 마스크 패턴의 총 행과 열의 수를 나타낸다.

왜곡을 구하기 위하여 마스크 중심을 원점으로 한 마스크 패턴의 좌표를  $Ref_{mn}$ 라 하자.

$Ref_{mn}$ 의 좌표들은 광학계를 지나면서 배울만큼 확대 또는 축소되는데 문제는 제작된 광학계의 배율을 정확히 알 수 없다는 것이며 또한 측정된 이미지의 좌표들인 식 (6)의  $P_{mn}$ 이  $Ref_{mn}$ 대비 상대적으로 회전성분이 있다는 것이다. 이것은 센서가 초기에  $Ref_{mn}$ 에 대해 회전 성분이 있을 수 있기 때문이다. 현재 알려지지 않은 광학계의 실제 배율을 M이라 하고 마스크 좌표와 측정된 이미지좌표의 상대적인 회전성분을  $\alpha$ 라 하자. 마스크의 좌표에 배율 M을 곱하고 식 (3)의 회전 행렬  $R(\alpha)$ 를 적용한 좌표를  $Mk_{mn}$ 이라 하면 왜곡이 없는 이상적인 경우 두 좌표는 일치하게 될 것이다. 실제로는 왜곡으로 인하여 두 좌표계 사이에 차가 존재하게 되고 이들 차의 RMS가 최소가 되는 M과  $\alpha$ 를 구할 수 있다. 이로부터 광학계의 배율과 왜곡수차를 구할 수 있다. 배율과 회전을 고려한 새로운 마스크 좌표  $Mk_{mn}$ 는 식 (7)과 같이 표현한다.

$$Mk_{mn}(M, \alpha) = R(\alpha) \cdot M \cdot Ref_{mn} \quad \begin{cases} m = 1, 2, 3, \dots, J \\ n = 1, 2, 3, \dots, K \end{cases} \quad (7)$$

마스크 좌표  $Mk_{mn}$ 와 측정 이미지 좌표  $P_{mn}$ 의 거리차에 대한 RMS는 식 (8)과 같이 계산된다.

$$RMS(M, \alpha) = \sum_{m=1n=1}^K J \frac{\sqrt{(Mk_{mn}(M, \alpha) - P_{mn})^2}}{J * K} \quad (8)$$

$$\begin{cases} m = 1, 2, 3, \dots, J \\ n = 1, 2, 3, \dots, K \end{cases}$$

위 과정을 통해 계산된  $P_{mn}$ 와  $Mk_{mn}$ 를 이용하여 왜곡수차 (Distortion)의 정의 식 (9)으로부터 왜곡수차를 계산할 수 있

다. 이중 가장 큰 거리차를 나타낸 좌표간의 거리를 최대왜곡수차(Max Distortion)라 하며 이를 광학계의 왜곡수차로 나타낸다.

$$Distortion(\%) = \frac{P_{mn} - Ref_{mn}}{Ref_{mn}} * 100 \begin{cases} m = 1, 2, 3, \dots, j \\ n = 1, 2, 3, \dots, k \end{cases} \quad (9)$$

여기서 중요한 사실은 계산된 배율  $M$ 은 근축광선에 의한 배율이 아니고 왜곡수차를 최소화하는 배율(Calibrated Magnification)임을 주목해야 한다.

#### IV. 측정결과

본 논문에서는 본문에 제시된 방식을 이용하여 왜곡을 측정하였다. 그림 9는 제작된 측정장비의 사진이다. 측정 장치는 405 nm의 광원과 조명계, 마스크 스테이지, 렌즈 스테이지, wafer 스테이지와 CMOS센서로 구성 되어있다. 모든 스테이지는 메뉴얼로 구성되어 스테이지의 정확도는 고려되지 않는 측정 장치이다. 실험에 사용한 렌즈는 설계 배율 2.435 배 프로젝션 렌즈로써 노광 Test를 통해 측정된 왜곡 수차는 1.8  $\mu\text{m}$ 이며, 그림 10은 측정 패턴 이미지이다.

CMOS카메라로 1회 촬영 시 21×21의 사각패턴이 얻어지며 전체 이미지를 얻기 위해 스테이지를 5×5회 이동하여 측정하였다. 중첩에 사용된 패턴좌표는 21by2을 사용하였다. 총 97×97 패턴좌표로 왜곡 수차 계산을 진행하였다. 측정 결과는 그림 11과 같다.

그리고 표 1에는 마스크의 패턴 좌표( $Ref_{mn}$ )와 측정을 통해 얻어진 패턴 좌표(P)의 97×97 중 3×3의 자료만을 발췌하여 표로 작성하였다.

이 자료를 통해 식 (7)과 식 (8)에서 배율(M)과 회전각도 ( $\alpha$ )를 얻어낼 수 있다. 계산결과 배율은 -2.436, 그리고 회전각도는 -0.255degree로 계산되었다. 다시, 이 두 정보를 이용하여 식 (7)에서 언급했던 Mk좌표를 얻을 수 있다. 이를 통해

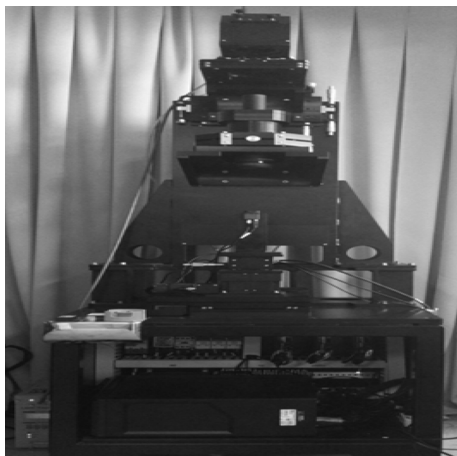


FIG. 9. The instrument for measurement of distortion.

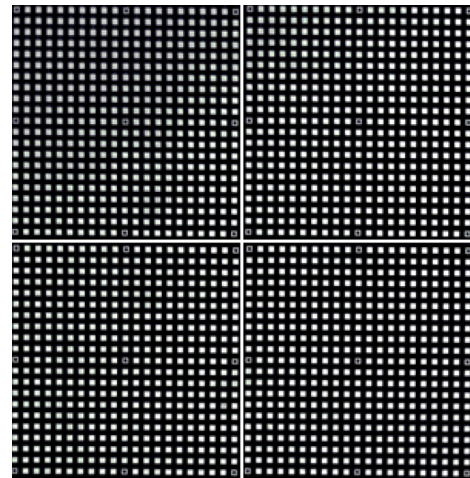


FIG. 10. The image of mask pattern through the optical system with magnification 2.435.

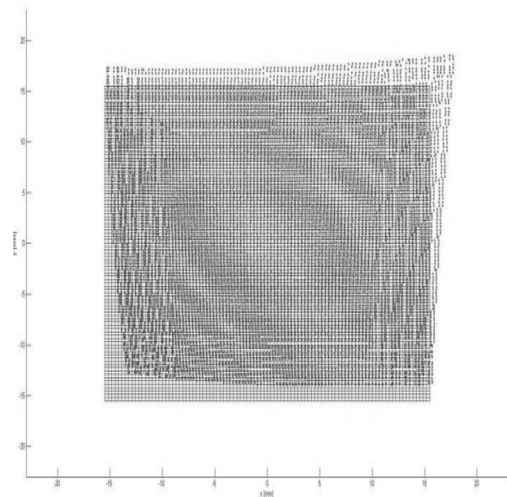


FIG. 11. Grid distortion (Field 30.547 mm by 30.547 mm, Maximum distortion 1.853  $\mu\text{m}$ , Scale : 2000.000X, Wavelength : 0.405  $\mu\text{m}$ ).

TABLE 1. the coordinate values of mask pattern( $Ref_x, Ref_y$ ) and image pattern( $P_x, P_y$ ) (3 by 3) (unit : mm)

| # | $Ref_x$   | $Ref_y$   | $P_x$      | $P_y$      |
|---|-----------|-----------|------------|------------|
| 1 | -6.363957 | -6.363957 | 15.432350  | 15.570036  |
| 2 | -6.363957 | 0.000000  | 15.502030  | 0.068679   |
| 3 | -6.363957 | 6.363957  | 15.571335  | -15.434338 |
| 4 | 0.000000  | -6.363957 | -0.069147  | 15.501660  |
| 5 | 0.000000  | 0.000000  | 0.000000   | 0.000000   |
| 6 | 0.000000  | 6.363957  | 0.068832   | -15.503332 |
| 7 | 6.363957  | -6.363957 | -15.571551 | 15.432557  |
| 8 | 6.363957  | 0.000000  | -15.502847 | -0.069315  |
| 9 | 6.363957  | 6.363957  | -15.434545 | -15.572938 |

실 측정을 통해 얻어진 패턴좌표 P와 Mk의 비교를 통해 왜곡수차를 계산하게 된다. 표 2는 배율과 회전각도를 적용한

**TABLE 2.** Distortion measurement data (3 by 3) ( $M_{kx}$ ,  $M_{ky}$  : the coordinate values of mask pattern considering magnification ( $M$ ) and rotation ( $\alpha$ ),  $P_x$ ,  $P_y$  : the coordinate values of image pattern) (unit : mm)

| # | $M_{kx}$   | $M_{ky}$   | $P_x$      | $P_y$      | Distortion |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | 15.433451  | 15.571442  | 15.432350  | 15.570036  | 0.001786   |
| 2 | 15.502446  | 0.068995   | 15.502030  | 0.068679   | 0.000523   |
| 3 | 15.571442  | -15.433451 | 15.571335  | -15.434338 | 0.000893   |
| 4 | -0.068995  | 15.502446  | -0.069147  | 15.501660  | 0.000801   |
| 5 | 0.000000   | 0.000000   | 0.000000   | 0.000000   | 0.000000   |
| 6 | 0.068995   | -15.502446 | 0.068832   | -15.503332 | 0.000900   |
| 7 | -15.571442 | 15.433451  | -15.571551 | 15.432557  | 0.000900   |
| 8 | -15.502446 | -0.068995  | -15.502847 | -0.069315  | 0.000512   |
| 9 | -15.433451 | -15.571442 | -15.434545 | -15.572938 | 0.001853   |

**TABLE 3.** Average distortion by repeat measurement (unit : mm)

| Measurements              | Max Distortion ( $\mu\text{m}$ ) |
|---------------------------|----------------------------------|
| 1                         | 1.81                             |
| 2                         | 1.79                             |
| 3                         | 1.78                             |
| 4                         | 1.83                             |
| 5                         | 1.81                             |
| 6                         | 1.81                             |
| 7                         | 1.82                             |
| 8                         | 1.77                             |
| 9                         | 1.78                             |
| 10                        | 1.83                             |
| Average ( $\mu\text{m}$ ) | 1.8                              |

새로운 마스크 좌표  $M_k$ 와 측정좌표  $P$ 로부터 계산된 왜곡수차를 보여주며, 최대 왜곡수차(Max Distortion)는 1.853  $\mu\text{m}$ 임을 알 수 있다.

이 측정치는 실제 왜곡수차와 약간의 차이가 있는데 주원인으로 CCD의 왜곡이 예상 된다. 따라서 정확한 왜곡 측정을 위해서는 CCD센서의 왜곡을 보정시켜야 한다. 센서의 왜곡측정방법은 정확한 왜곡을 알고 있는 광학계를 이용하여 얻을 수 있다.

본 측정에서 사용한 렌즈에 대한 10회 반복측정결과를 표 3에 정리하였다.

### V. 결 론

본 논문에서는 스테이지의 이송불확도를 감안하지 않고 왜곡수차(Distortion)와 배율을 측정할 수 있는 방법과 이론을 제시하였다. 특히 매뉴얼 스테이지를 이용하여도 이들을 측정할 수 있는 장점이 있다. 스테이지의 정밀도에 의존하지 않는 점 이외에 장점으로써 왜곡수차보정을 위해 실시간 측정이 가능하다는 점과, 교정배율(Calibrated Magnification)을

구할 수 있다는 것이다.

본 측정에 사용된 렌즈는 배율 2.436이고 노광테스트결과 왜곡수차가 1.8  $\mu\text{m}$ 인 프로젝션 렌즈를 이용하여 측정한 결과 1.853  $\mu\text{m}$ 의 값을 얻었다. CMOS센서 자체의 왜곡을 고려하지 않아 약간의 차이가 있는 것으로 예상된다.

본 측정 방법을 통해 1  $\mu\text{m}$ 이하의 정확도로 왜곡수차를 측정할 수 있음을 확인하였고, 측정 값으로부터 교정배율과 왜곡수차를 계산하는 방법에 타당성이 있음을 볼 수 있었다.

### References

1. F. Hong, X. Mujun, and W. Zhiqian, "The research on distortion measurement and compensation technology in photoelectricity measurement system," in *Proc. 2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE)* (Changchun, China, Aug. 2010), vol. 4, pp. 383-388.
2. D. W. Park and S. G. Woo, "Method for measuring distortion of exposure equipment," Patent No. 100604944, 19 July 2006.
3. J. Lin, M. Xing, D. Sha, D. Su, and T. Shen, "Distortion measurement of CCD imaging system with short focal length and large-field objective," *Optics and Lasers in Engineering* **43**, 1137-1144 (2005).
4. J. Hou, H. Li, Z. Zheng, and X. Liu, "Distortion correction for imaging on non-planar surface using freeform lens," *Opt. Comm.* **285**, 986-991 (2012).
5. K. H. Hong, "Astigmatism, field curvature, and distortion," *Geometrical Optics Rev.* **1**, 140-141 (2011).
6. J. Greivenkamp, "Distortion," *Field Guide to Geometrical Optics*, 80 (2004).
7. P. L. Reu, R. L. Engelstad, and E. G. Lovell, "Mask distortion issues for next-generation lithography," *Microelectronic Engineering* **69**, 420-428 (2003).
8. J. Canny, "A computational approach to edge detection," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **8**, 679-698 (1986).