

## 2 차원 자가 보정 알고리즘에서의 불확도 전파

유승봉\*(한국과학기술원 기계공학과), 김승우(한국과학기술원 기계공학과)

### Error propagation in 2-D self-calibration algorithm

S. Yoo(Mechanical Eng Dept. KAIST), S. W. Kim(Mechanical Eng. Dept., KAIST)

#### ABSTRACT

Evaluation of the patterning accuracy of e-beam lithography machines requires a high precision inspection system that is capable of measuring the true xy-locations of fiducial marks generated by the e-beam machine under test. Fiducial marks are fabricated on a single photo mask over the entire working area in the form of equally spaced two-dimensional grids. In performing the evaluation, the principles of self-calibration enable to determine the deviations of fiducial marks from their nominal xy-locations precisely, not being affected by the motion errors of the inspection system itself. It is, however, the fact that only repeatable motion errors can be eliminated, while random motion errors encountered in probing the locations of fiducial marks are not removed. Even worse, a random error occurring from the measurement of a single mark propagates and affects in determining locations of other marks, which phenomenon in fact limits the ultimate calibration accuracy of e-beam machines. In this paper, we describe an uncertainty analysis that has been made to investigate how random errors affect the final result of self-calibration of e-beam machines when one uses an optical inspection system equipped with high-resolution microscope objectives and a precision xy-stages. The guide of uncertainty analysis recommended by the International Organization for Standardization is faithfully followed along with necessary sensitivity analysis. The uncertainty analysis reveals that among the dominant components of the patterning accuracy of e-beam lithography, the rotationally symmetrical component is most significantly affected by random errors, whose propagation becomes more severe in a cascading manner as the number of fiducial marks increases

**Key Words** : Self-calibration (자가 보정), Uncertainty Evaluation (불확도 계산), Error Propagation (불확도 전파)

#### 1. 서론

E-beam lithography 스테이지의 정밀도는 lithography 장비로 일정한 간격으로 표식을 가진 시편을 제작하고, 이 시편의 표식이 갖는 실제 위치를 측정 장비를 이용하여 측정함으로써 평가하게 된다. 일반적으로 평가에 사용되는 시편은 2 차원 배열의 일정한 간격으로 배열된 표식을 하나의 photo-mask 위에 식각하여 제작하게 된다.<sup>1)</sup> 제작된 시편을 고 정밀도로 2 차원의 좌표를 계산할 수 있는 측정장비를 이용하여 실제 표식의 위치를 측정하여 이 측정 값과 실제 설계 값과의 차이를 이용하여 lithography 장비의 오차를 계산해 내고 이 결과를 이용하여 스테이지의 보정 작업을 수행하게 된다.

시편을 측정하는 측정 시스템은 보정하고자 하는 lithography 장비 보다 높은 정밀도를 보장하면서 시편에 포함된 표식의 2 차원 좌표를 측정하여야 한다. 반도체 공정에서 사용되는 임계 치수가 0.1  $\mu\text{m}$  수준에 이르고 있기 때문에 측정 장비에서 이보다 높은 측정 정밀도가 요구되고 있으며 이러한 요구 조건을 만족 시키기 위하여 전체 영역에 대하여 nm 수준의 정밀도가 보장되는 측정 시스템이 필요하게 된다. 이러한 요구조건을 만족시키기 위하여 측정 시스템이 갖고 있는 오차를 제거하는 보정 작업이 필요하다. 측정 시스템의 오차를 보정하기 위하여 이보다 높은 정밀도의 표준 시편을 이용해야 하지만 이러한 표준 시편을 제작하는 것이 불가능하기 때문에 새로운 보정 방법이 필요하게 된다.

이와 같이 표준 시편의 제작이 불가능한 상황에서 자가 보정이라는 방법은 표준 시편을 사용하지 않고 측정기가 갖는 오차를 보정할 수 있다. 자가 보정 방법은 정확한 형상을 모르는 시편을 측정기를 사용하여 여러 위치에서 측정하여 그 측정 결과를 비교함으로써 측정기의 오차를 계산해 내는 방법이다. 이러한 자가 보정 방법은 고전적인 반전법<sup>[2]</sup>등에서 시작하여 최근에는 반도체 장비에 사용할 수 있는 2차원 알고리즘이 발표된 바 있다.<sup>[3][4]</sup>

보정 작업을 통하여 보상할 수 있는 측정기의 오차는 같은 위치에서 항상 같은 값을 갖는 계통 오차이다. 이와 반대로 측정기가 갖는 오차 중에서 예측할 수 없이 통계적으로만 처리가 가능한 임의 오차 성분이 존재한다. 일반적인 보정 방법에서는 이러한 임의 오차 성분은 측정기가 갖는 반복능 수준으로 정의 할 수 있어 보정 후에도 이러한 임의 오차 성분을 포함한다고 생각할 수 있다. 이에 비하여 자가 보정 방법은 여러 번 측정된 측정 데이터를 이용하여 측정기가 갖는 계통오차를 계산하기 때문에 임의 오차 성분이 자가 보정 알고리즘을 거치면서 최종 결과에 한 점을 측정하는데 포함되는 임의 오차량과 다른 영향을 미칠 수 있다.

본 논문에서는 이러한 임의 오차 성분이 2차원 자가 보정 알고리즘을 거치면서 어떻게 전파되고 있는지를 살펴보았다. 이를 위하여 ISO에서 제안한 측정 불확도 계산 지침<sup>[5]</sup>에 의거하여 각각의 표식을 측정하는데 포함된 임의 오차 성분이 최종 결과에 어떤 식으로 영향을 미치고 있는지를 정량적으로 계산하였다.

## 2. 2차원 자가 보정 알고리즘<sup>[4]</sup>

반도체 장비등에 적용할 수 있는 2차원 자가 보정 알고리즘은 J. Ye에 의해 발표되었다. 2차원

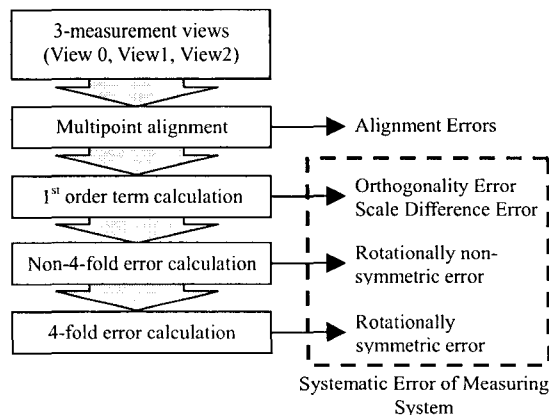


Fig 1. Procedure of Self-calibration to separate systematic errors

자가 보정 알고리즘은 2차원 격자형태로 배열된 표식의 좌표를 보정하고자 하는 측정기를 이용하여 기준 위치, 중심을 기준으로 90° 회전한 위치, 그리고 배열의 한 격자 간격만큼 X축으로 이동한 위치에서의 세가지 측정 데이터를 이용하여 일련의 계산 과정을 통하여 측정기가 갖고 있는 계통오차를 계산해 낸다. 알고리즘의 전체 흐름은 그림 1과 같다. 오차를 포함한 측정기를 이용하여 시편을 측정할 경우 시편의 형상과 측정기가 갖는 오차가 조합된 형태의 측정 결과를 얻게 된다. 이 측정 결과 중에서 시편의 형상과 측정기의 오차가 동일한 위치에서 동일한 값을 갖는다고 가정하면 세가지 위치에서의 시편의 측정 결과는 측정기의 오차와 시편의 형상에 대한 서로 다른 조합의 식으로 나타나게 된다. 그림 1에 나타난 일련의 과정은 서로 다른 세가지 조합의 측정 결과로부터 측정기가 갖고 있는 오차만을 계산하는 순서도를 나타낸다. J. Ye가 발표한 논문의 기호를 그대로 사용할 경우 최종 결과로 얻어지는 측정기의 오차는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} G_{x,m,n} &= Oy_n + Rx_m + F_{4,x,m,n} + F_{n4,x,m,n} \\ G_{y,m,n} &= Ox_m - Ry_n + F_{4,y,m,n} + F_{n4,y,m,n} \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에서  $G_{x,m,n}$ ,  $G_{y,m,n}$ 은 측정기가 갖는 전체 오차,  $O$ 는 측정기의 XY축 간의 직각도 오차,  $R$ 은 XY축 사이에 존재하는 비율차이 오차, 그리고  $F_{4,x,m,n}$ 과  $F_{n4,x,m,n}$ 등은 각각 좌표계에 대한 4주기 회전 성분과 비 4주기회전 성분을 나타낸다.

## 3. 자가 보정 알고리즘의 불확도 계산 방법

ISO에 의하여 제안된 불확도 계산방법에 따르면 계산 결과에 영향을 미치는 인자들의 불확도는 전체 결과에 대하여 식 (2)와 같은 형태로 주어진다.

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left( \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \right) u(x_i) u(x_j) \quad (2)$$

where  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$

자가 보정 알고리즘내에서의 불확도 전파를 계산하기 위해서는 식 (1)과 같이 주어지는 측정기의 오차식에 식 (1)을 적용하여 식 (3)과 같은 형태로 임의 오차에 의한 영향을 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
u^2(G_{x,m,n}) &= \left(\frac{\partial G_{x,m,n}}{\partial O}\right)u^2(O) + \left(\frac{\partial G_{x,m,n}}{\partial R}\right)u^2(R) \\
&\quad + \left(\frac{\partial G_{x,m,n}}{\partial F_{4,x,m,n}}\right)u^2(F_{4,x,m,n}) + \left(\frac{\partial G_{x,m,n}}{\partial F_{n4,x,m,n}}\right)u^2(F_{n4,x,m,n}) \\
&= y_n^2 u^2(O) + x_n^2 u^2(R) + u^2(F_{4,x,m,n}) + u^2(F_{n4,x,m,n}) \\
u^2(G_{y,m,n}) &= x_n^2 u^2(O) + y_n^2 u^2(R) + u^2(F_{4,y,m,n}) + u^2(F_{n4,y,m,n})
\end{aligned} \quad (3)$$

식 (1)의 표현에서 직각도 오차 O, 비율차이 오차 R 그리고 4 주기 회전 대칭 성분과 비대칭 성분  $F_{4,x,m,n}$  과  $F_{n4,x,m,n}$  은 최종 결과식인 측정기의 오차에 대하여 모두 서로에 대하여 독립으로 생각할 수 있으므로 식(2)에서 나타나는 cross-correlation 성분은 나타나지 않는다. 또 이러한 각각의 오차 성분들은 알고리즘에서 3 개의 위치에서 측정된 측정 데이터로부터 계산해 내게 되므로 이들은 다시 세 개의 측정 데이터에 의한 함수로 생각할 수 있다. 따라서 식 (3)에 나타난 각 오차 성분들의 불확도는 다시 세가지 측정 데이터의 측정 불확도를 이용하여 계산할 수 있다.

측정기가 갖고 있는 측정 불확도는 모든 측정 데이터에 대하여 일정한 값을 갖는다고 가정하면 3 가지 위치에서의 각 측정점의 불확도는 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
u(V_{i,x,m,n}) &= u(V_{i,y,m,n}) = u_0 \\
\text{where } i &= 0,1,2, \text{ and } m, n = -\frac{N-1}{2}, \dots, \frac{N-1}{2}
\end{aligned} \quad (4)$$

식 (3)과 같이 전체 알고리즘의 불확도를 계산하기 위하여 필요한 각 불확도 성분들은 그림 1 과 같은 알고리즘의 진행을 따라 식 (2)와 같이 주어지는 불확도 계산 방법을 적용하여 계산할 수 있다.

#### 4. 자가 보정 알고리즘의 불확도 계산 결과

시편의 측정을 통하여 얻는 측정 결과는 측정 시편과 측정 시스템의 오차와 함께 두 오차를 정의하는 좌표계 사이의 정렬에 의한 오차까지 포함된다. 이 정렬 오차는 각 좌표계의 정의에 의하여 측정 결과를 이용하여 계산할 수 있다. 이때 각 측정 결과에 포함되는 불확도가 식 (4)와 같이 포함되기 때문에 이를 통하여 계산된 정렬 오차는 식 (5)와 같은 불확도를 포함하게 된다.

$$u^2(t_x) = u^2(t_y) = \frac{u_0^2}{N^2} \quad u^2(\theta) = \frac{6}{N^2(N^2-1)} \left(\frac{u_0}{\Delta}\right)^2 \quad (5)$$

식 (5)에서 측정 결과로부터 계산한 정렬오차는 표식의 개수를 증가시키기에 따라 그 값이 0 으로 수렴하는 것을 확인 할 수 있다. 마찬가지로 방법으로 1 차 성분 오차와 고차 성분 오차에 대하여 식 (2)의 불확도 계산식을 적용하게 되면 그림 2 에서 그림 6 까지의 불확도 계산 결과를 얻을 수 있다.

그림 2 는 1 차 오차 성분을 계산한 결과로 사용하는 시편의 표식의 수를 늘릴수록 그 결과에 포함된 불확도는 0 으로 수렴하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 오차를 계산하는 과정이 일종의 가중 평균을 계산하는 과정과 동일하기 때문에 각 측정에 포함된 불확도가 많은 측정 데이터를 이용할수록 감소하기 때문이다.

마찬가지로 고차 성분의 오차 중에서 회전 불변 성분의 경우도 서로 90° 회전 위치의 측정 결과로

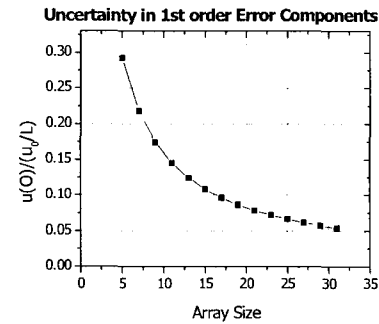


Fig 2. Uncertainty in 1<sup>st</sup> order terms

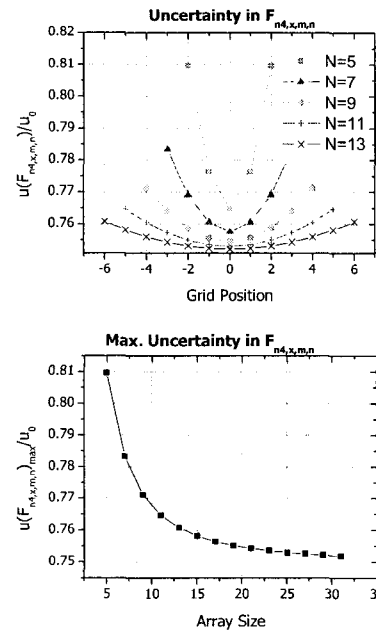


Fig 3. Uncertainty of rotationally non-symmetric error component by discrete algorithm

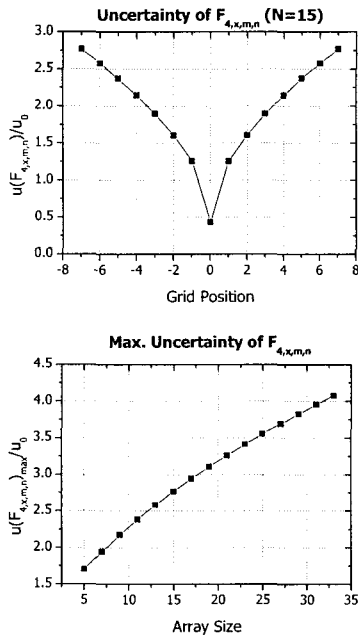


Fig 4. Uncertainty of rotationally symmetric error component by discrete algorithm

계산을 수행하기 때문에 계산 결과에 포함되는 불확도는 그림 3 과 같이 각 측정 결과의 불확도보다 작은 값으로 나타나게 된다.

이에 비하여 회전 대칭 오차 성분의 경우에는 계산과정에 포함된 캐스캐이드 과정(cascading

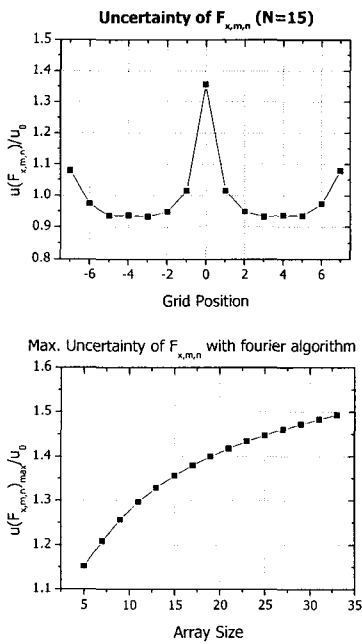


Fig 5. Uncertainty of higher order error components by Fourier algorithm

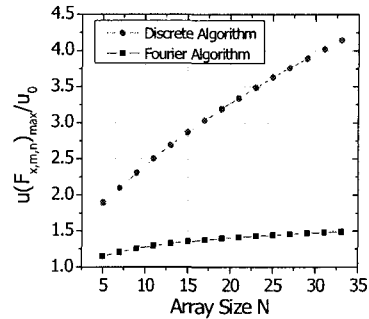


Fig 6. Maximum uncertainty amplification in 2-D self-calibration algorithm

process)에 의하여 그림 4 와 같이 각 측정에 포함된 불확도가 증폭되는 효과가 나타나게 된다. 이러한 과정은 시편의 표식의 개수를 증가시킴에 따라 그 값이 더욱 증가하는 경향을 보인다. 고차 성분을 계산하는 또 다른 방법인 푸리에 알고리즘에서는 이러한 캐스캐이드 과정이 최소화 되기 때문에 알고리즘을 통한 불확도의 증폭이 줄어들게 된다. 그림 6 은 불확도 계산을 통한 최종 결과에서 증폭되는 불확도를 보여준다.

#### 4. 결론

2 차원 자가 보정 알고리즘을 통하여 임의 오차 성분이 증폭되는 과정을 불확도 계산을 통하여 살펴보았다. 계산 결과 사용하는 시편의 표식의 개수가 증가함에 따라 측정에 포함된 불확도가 증폭되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 자가 보정 방법을 적용할 때 사용하는 시편의 표식의 개수를 선정하는 기준이 될 수 있다.

#### 참고문헌

1. B. Lieberman, "Quality assurance procedures for MEBES", *J. Vac. Sci. Technol.*, **15**(3), 913-916, 1978
2. C. J. Evans et al., "Self-calibration: Reversal, Redundancy, Error Separation, and Absolute Testing", *Annals of the CIRP*, **45**(2), 617-634, 1996
3. M. R. Raugh, "Absolute two-dimensional sub-micron metrology for electron beam lithography: A calibration theory with applications", *Prec. Eng.*, **7**(1), 3-13, 1985
4. J. Ye, et al., "An Exact algorithm for self-calibration of tow-dimensional precision metrology stages", *Prec. Eng.*, **20**(1), 16-23, 1997
5. *Guide to the expression of the uncertainty in measurement*, International Organization for Standardization, Geneva, 1995