

論文99-36D-11-5

## 경계요소법을 이용한 위상변이 마스크의 단차 효과 분석

(Analysis of Topological Effects of Phase-Shifting Mask by Boundary Element Method)

李東勳\*, 金顯俊\*, 李升杰\*, 李鐘雄\*\*

(Dong Hoon Lee, Hyun Jun Kim, Seung Gol Lee, and Jong-Ung Lee)

### 요 약

2차원 위상변이 마스크의 단차 효과를 분석하기 위해 투명 경계조건, 주기적인 경계조건, 및 연속조건을 가진 경계요소법을 광 리소그래피 공정 시뮬레이션에 새로이 적용하였으며, 해석적인 해와 참고문헌의 결과와 비교함으로써 구현된 모듈의 정확성을 검증하였다. 또한, 기존의 rigorous coupled wave analysis에 의한 방법에 비해 수렴성과 계산 시간 측면에서 경계요소법을 이용하는 것이 더 효율적임을 확인하였다. 끝으로 비교적 간단한 위상변이 마스크와 다층 위상변이 마스크에 대한 최적 설계 과정을 기술하였다.

### Abstract

The boundary element method was newly implemented into an optical lithography simulator so that it could evaluate rigorously the topological effects of 2-dimensional phase-shifting masks. Both transparent and periodic boundary conditions were applied for the method, and the continuity conditions were used for treating interface nodes. The accuracy of the module developed for simulating aerial images was verified by comparison with analytic solutions and published results. In addition, it was found that our simulator would be more efficient than the conventional method based on the rigorous coupled wave analysis in views of the convergence and the calculation speed. Finally, the optimal design of two phase-shifting masks was performed.

### I. 서론

반도체 소자의 고집적화, 소형화의 추세에 따라 광 리소그래피 장비의 해상력 한계를 확장시키고자 하는

노력이 리소그래피 공정의 거의 모든 부분에 있어왔으며 그 중, 마스크와 관련된 고해상도 기술로서 위상변이 마스크(phase-shifting mask, 이하 PSM이라 함.)가 있다. PSM의 사용으로 광 리소그래피의 한계를 연장할 수 있는 길을 열게 되었으나, 보통 마스크와 달리 마스크 표면이 기하학적 구조를 갖게 됨에 따라 식각된 부분과 식각되지 않은 부분간의 세기(intensity) 차이가 발생되고 이로 인해 불완전한 패턴 전이 등의 단차 효과가 발생된다. 이러한 문제점을 최소화하기 위하여 PSM 구조를 변형하고 변형된 마스크의 aerial image를 전산 시뮬레이션으로 PSM의 최적 설계조건을 찾고자 하는 시도가 있어 왔다<sup>[1-2]</sup>.

그 동안 마스크의 aerial image를 분석하기 위해 여러 가지 수치 해석적인 방법이 시도되었으며, rigorous

\* 正會員, 仁荷大學校 電子·電氣·컴퓨터 工學部  
(School of Electrical and Computer Engineering, Inha University)

\*\* 正會員, 淸州大學校 光學工學科  
(Dept. of Optical Engineering, Chongju University)

※ 본 연구는 1993년 인하대학교 교내 연구비 지원으로 이루어졌습니다.

接受日字: 1999年6月15日, 수정완료일: 1999年9月27日

coupled wave analysis(RCWA, 혹은 waveguide method)<sup>[3, 4]</sup>가 그 중의 하나이다. RCWA는 컴퓨터로의 이식이 비교적 쉽고 매질이 균일하고 평탄한 경우에는 매우 유용하게 사용될 수 있어서 그 동안 이에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다. 하지만, RCWA는 복잡한 구조를 가지는 경우 수치 해석적인 불안정성이 존재하며, 계산영역 내에 금속 영역이 포함되고 특히 입사광이 TM 편광인 경우 해의 수렴이 매우 늦다는 점, RCWA의 특성상 회절광의 차수를 충분히 고려하여야만 정확한 해로 수렴되므로<sup>[5]</sup> 그에 따른 계산 시간의 기하급수적인 증가 등, 다수의 단점이 존재한다. 따라서, PSM과 같이 비교적 복잡한 구조를 가지는 마스크의 결상 해석에는 비효율적임을 예측할 수 있는데, 이러한 비효율성은 특히 3차원 구조에서 더 심화 될 수 있을 것으로 생각된다.

따라서 본 논문에서는 RCWA의 단점을 보완하고 개선하는데 중점을 두고 새로운 알고리즘인 경계요소법(boundary element method)을 광 리소그래피 공정용 시뮬레이터인 LG-OLiS<sup>[6]</sup>의 aerial image simulation 모듈(이하 LG-AIS 모듈이라 함)에 도입하였다. 그간, 경계요소법은 전자기학, 기계공학, 유체, 항공역학 등의 여러 분야에서 활용되어 왔으나, 반도체 공정 시뮬레이션에는 사용된 적이 거의 없었다. 이 방법은 계산영역의 차원(dimension)을 한 차원 낮출 수 있으므로 또 다른 수치 해석적 방법인 유한요소법<sup>[7-8]</sup>과 비교할 때, node 설정에 따른 메모리 량을 대폭 줄일 수 있는 이점을 갖는다. 또한, 본 논문에서 다루는 PSM 문제의 경우, 계산 영역 내부의 전기장 표현을 구할 필요가 없으며, 단지, 아래쪽 경계선에서의 전기장 표현만을 필요하므로 계산영역 내부에 node를 설정하고 그 값을 모두 계산해야 하는 FEM 보다 2, 3차원의 계산영역을 가지는 복잡한 구조의 마스크에 대한 aerial image 계산에 매우 유용할 것이라 판단된다.

II장에서 시뮬레이터에 사용된 경계요소법 이론과 경계조건의 적용에 대하여 기술하고 III, IV장에서는 구현한 모듈의 정확성을 알아보고 계산시간과 해의 수렴성을 기존의 RCWA와 비교하여 객관적인 타당성과 그 효율성을 알아봄으로써 aerial image 분석에 있어서 경계요소법에 의한 방법이 RCWA에 의한 접근방법의 효과적 대안임을 보였다. 그리고 표면에 단차를 가지는 마스크에 대한 aerial image 분석을 실시하고 최종적으로 결론을 기술하였다.

## II. 경계요소법을 이용한 Aerial image 계산 이론

### 1. Helmholtz 방정식 풀이를 위한 경계요소법

PSM의 단차 효과를 이해하기 위해서는 Maxwell 방정식 혹은 Helmholtz 방정식을 풀어 stepper 광원으로 부터 PSM에 입사되는 빛과 PSM의 상호작용을 계산한 다음, 결상 이론을 적용하여 웨이퍼 면에 형성되는 aerial image를 구해야 한다. 단차 효과를 갖는 PSM의 경우는 입사광과 PSM의 상호작용을 엄정하게 계산해야 하므로, RCWA<sup>[1,3-6]</sup>, 유한요소법<sup>[7-8]</sup>, 유한차분법<sup>[9]</sup> 등의 수치 해석적 방법이 활용되어 왔다. 하지만, 본 논문에서는 경계요소법을 이용하여 이 문제를 엄정하게 다루고 이로부터 PSM의 aerial image를 구하여 단차 효과를 분석하고자 한다. 이미 경계요소법이 Helmholtz 방정식 풀이에 적용된 바 있지만<sup>[10-11]</sup>, 도파로(waveguide) 문제에 제한적으로 활용되었으며, 위상변이 마스크 문제에 적용된 바는 없는 것으로 파악된다. 경계요소법을 적용하는 기본 과정은 참고문헌<sup>[12]</sup>와 같지만, 위상변이 마스크 문제에 있어 경계조건의 유도나 적용 과정은 도파로 문제와는 아주 다르므로, 본 논문에는 경계조건과 연속조건의 적용과정을 상세히 기술할 것이다.

경계요소법의 적용 과정은 다음과 같다. 우선, 그림 1(a) 영역의 지배 방정식(governing equation)인 Helmholtz 방정식(1)에 Green 정리<sup>[13]</sup>와 경계조건을 적용함으로써,

$$\nabla^2 u + k^2 u = 0 \quad (1)$$

경계나 내부 각 점에서의 전기장  $u_p$ 를 경계  $B$  위의 전기장과 전기장의 법선 편도함수(outward normal derivative)의 선적분으로 표현할 수 있으며, 이러한 적분방정식(surface integral equation)은 식 (2)와 같다<sup>[12]</sup>.

$$u_p + \int_B u q^* dc = \int_B q u^* dc \quad (2)$$

$$k = \frac{2\pi n}{\lambda_v}$$

( $n$  : 계산영역 내부의 굴절률,  $\lambda_v$  : 진공에서 빛의 파장)

식(2)에서  $u_p$ 는 그림 1(a)에서처럼 계산영역의 경계

(점  $P'$ ) 혹은 내부에 존재하는 임의의 점 (점  $P$ )에  
서의 전기장을 의미하며, 식 (2)의 적분 항에 있는  
 $u, q$ 는 경계  $B$  위에 존재하는 각 점의 전기장과 그에  
대한 법선 편도함수를 의미한다. 또한,  $u^*, q^*$ 는 적분  
방정식을 유도하는 과정에서 도입된 Green 함수와  
Green 함수의 법선 편도함수로서 Hankel 함수의 형태  
로 주어진다<sup>[10]</sup>. 만일 경계  $B$ 의 모든 점에서  $u, q$  값  
을 알고 있다면, 식 (2)의 선적분을 통해 영역 내의 임  
의의 점  $P$ 에서 전기장 표현을 얻을 수 있다.

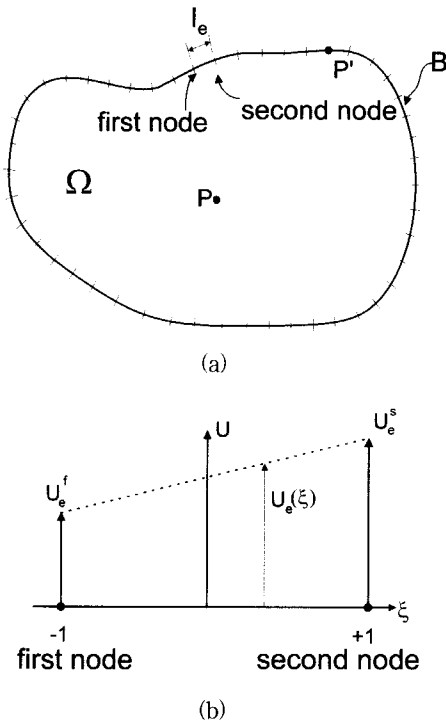


그림 1. (a) 전체 계산영역  $\Omega$ 에서의 경계  $B$ 와 그 경  
계의 분할

(b) 임의의 경계요소에서의  $\xi$ -정규화 좌표계

Fig. 1. (a) The boundary  $B$  of the overall domain  
 $\Omega$  and its discretization.

(b) The  $\xi$ -local coordinate system within an  
arbitrary boundary element.

그러나, 대부분의 경우 경계  $B$ 에 대한  $u, q$ 를 모두  
알고 있지 못하므로, 입사광과 경계에 관한 각종 경계  
조건을 활용하여 내부의 전기장 표현뿐만 아니라 경계  
에서의 전기장 표현을 동시에 결정해야 한다. 이 경우,  
식 (2)는 결정하고자 하는  $u, q$ 뿐만 아니라, 경계  $B$ 에  
서의 미지수  $u, q$ 를 동시에 포함하는 방정식이 될 것

이다. 이러한 방정식을 수치 해석적 방법으로 풀기 위  
해서는 경계  $B$ 를 길이가  $l_e$ 인 짧은 경계요소(boundary  
element)들로 분할하고, 각 경계요소 내에서 전기장이  
단순한 함수 형태로 표현 가능하다고 가정하여 식 (2)  
를 미지수에 관한 선형방정식으로 변환해 주어야 한다.  
각 경계요소는 두 개의 끝점, 즉 두 개의 노드(node)를  
가진다. 예로서  $e$ -번째 경계요소의 두 노드에서 전기  
장과 법선 편도함수를 각각  $u_e^f, u_e^s, q_e^f, q_e^s$ 라 하면, 경  
계요소 내의 한 점에서 전기장  $u_e$ 과 법선 편도함수  
 $q_e$ 는 그림 1(b)의 정규화된 좌표  $\xi$ 와 보간법(interpolat-  
ion method)을 이용하여

$$u_e(\xi) = u_e^f \phi_f(\xi) + u_e^s \phi_s(\xi)$$

$$q_e(\xi) = q_e^f \phi_f(\xi) + q_e^s \phi_s(\xi)$$

$$\begin{cases} \phi_f(\xi) = \frac{1+\xi}{2} \\ \phi_s(\xi) = \frac{1-\xi}{2} \end{cases} \quad (-1 \leq \xi < 1) \quad (3)$$

와 같이 표현할 수 있다. 여기서 아래 첨자  $e$ 는 경계  
요소를 구분하기 위한 것이며, 위첨자  $f$ 와  $s$ 는 경계  
요소의 첫 번째와 두 번째 노드를 의미한다. 식 (3)에  
도입된 함수  $\phi_f, \phi_s$ 를 형상함수(shape function)라 한  
다.

그림 1(a)에서와 같이 적분경로를 길이가  $l_e$ 인  $N$ 개  
의 경계요소로 나눈 후 각 경계요소 내의 전기장과 법  
선 편도함수를 식 (3)으로 표현하면, 식 (2)의 경계 적  
분 방정식은 다음과 같은 이산화 형태의 관계로 변환  
될 수 있다<sup>[14-15]</sup>.

$$c_p u_p + \sum_{e=1}^N [h_e^f, h_e^s] \begin{bmatrix} u_e^f \\ u_e^s \end{bmatrix} = \sum_{e=1}^N [g_e^f, g_e^s] \begin{bmatrix} q_e^f \\ q_e^s \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$c_p = 1 - \beta_p / 2\pi$$

( $\beta_p$ : 노드  $p$ 를 공유하고 있는 두 경계요소간의 사이각)

이 때  $h_e^f, h_e^s, g_e^f, g_e^s$ 는  $e$ 번째 경계요소에 대해 형상  
함수  $\phi_f, \phi_s$ 와 Green 함수 혹은 Green 함수의 법선  
편도함수의 곱을 선적분한 결과이다<sup>[12,14,15]</sup>.

경계  $B$ 에는 총  $N$ 개의 노드가 존재하는데, 이들 각  
노드에 점  $P$ 가 위치한다고 가정하면, 즉 식 (4)를 경  
계  $B$ 위의  $N$ 개의 노드에 대해 각각 적용하면, 식 (4)  
로부터  $N$ 개의 연립방정식을 얻게 된다. 이 결과는

$$H U = G Q \tag{5}$$

와 같은 행렬 형태로 나타낼 수 있다. 여기서 행렬  $H$  와  $G$  는  $(h_e^x, h_e^z), (g_e^x, g_e^z)$  로 구성되는  $N \times N$  행렬로서 influence matrix<sup>[12]</sup>라 하며,  $U$  와  $Q$  는  $N$  개의 노드에 정의된 전기장  $u$  와 법선 편도함수  $q$  로 구성된  $1 \times N$  열 벡터(column matrix)로서 미지수에 해당한다. 식 (5)에서 미지수의 수는  $2N$  으로서 연립방정식의 수보다 많으므로, 다음절에서 기술될 경계조건을 적용하여 미지수의 수를  $N$  개로 줄여야 한다.

2. 경계 및 연속조건의 적용

1) 단일 영역

그림 2는 경계요소법이 적용될 2차원 PSM의 개략적인 구조도로서, 지면과 나란한 평면은  $xz$  평면, 수직 방향은  $y$  축을 각각 의미한다. 단일 입사광이 TE 편광을 갖는다면, 입사광의 전기장 벡터는  $y$  축 성분만으로 표현되므로, 식 (1)의 Helmholtz 방정식을 경계요소법으로 풀어야 한다. 그러나, TM 편광을 갖는다면, 입사광의 자기장 벡터가  $y$  축 성분만으로 표현되므로, 자기장에 관한 Helmholtz 방정식을 풀어야 할 것이다. 본 절에서는 입사광이 TE 편광을 갖는 경우만을 취급하지만, TM 편광에 대해서도 동일한 방법을 적용할 수 있다. 경계요소법이 적용되는 전체 계산영역  $\Omega$  는 가로  $\Lambda$ , 세로  $(z_b - z_t)$  인 직사각형이며, 계산영역 내부는 굴절률이 서로 다른 매질들로 구성된다. 이때 전체 계산영역 위쪽을 입사 영역, 아래쪽을 투과 영역이라 하며, 전체 계산영역 내부와 경계에서의 전기장을  $U_\Omega(x, z)$  라 하자.

광 리소그래피 공정 시뮬레이션에서는 마스크 패턴이 주기적으로 배열되어 있다고 가정하므로 그림 2의 계산영역  $\Omega$  가 가로 방향으로 반복되어 있다고 간주할 수 있다. 그러므로, Floquet 정리에 의해 전기장은 평면파들의 선형 결합으로 표현 가능하다.

$$u(x, z) = \sum_j E^{(j)}(z) e^{-j(\alpha^{(j)}x + \beta^{(j)}z)} \tag{6}$$

위 식에서  $E^{(j)}$  는 평면파의 복소진폭(complex amplitude)이며  $e^{-j(\alpha^{(j)}x + \beta^{(j)}z)}$  는 시간 의존성  $e^{j\omega t}$  을 제외한 위상 항이다. 파동벡터(wave vector)가  $\mathbf{k} = \alpha^{(j)} \mathbf{a}_x + \beta^{(j)} \mathbf{a}_z$  이며 여기서  $j$  는 허수를,  $\omega$  는 빛의 각 진동수를,  $\mathbf{a}_x$

와  $\mathbf{a}_z$  는 각각  $x$  축과  $z$  축의 단위 벡터를 의미한다. 또한,  $\alpha^{(j)}$  와  $\beta^{(j)}$  는 파동벡터의  $x$  축과  $z$  축 성분으로 아래와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \alpha^{(s)} &= \alpha_0 + \frac{2\pi}{\Lambda} s, \quad \alpha_0 = k \sin \theta_0 \\ \beta^{(s)} &= \sqrt{k^2 - (\alpha^{(s)})^2}, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda_v} n \end{aligned} \tag{7}$$

여기서,  $\theta_0$  는 조명광 즉 입사광의 입사각이며,  $\alpha_0$  는 입사광의 파동벡터의  $x$  축 성분을 의미한다. 또한,  $k$  는 복소 굴절률(complex refractive index)이  $n$  인 영역에서 파동벡터의 크기를 의미하며,  $\lambda_v$  는 진공에서 빛의 파장을 의미한다. 식 (7)에서 위 첨자  $s$  는 각 평면파(회절광)의 회절차수(diffraction order)로 입사광과 동일한 방향으로 진행되는 평면파의 차수는 0번째 회절차수라 하며, 0번째 회절차수를 중심으로 좌측은 음수, 우측은 양수의 회절차수를 가진 회절광으로 분류한다.

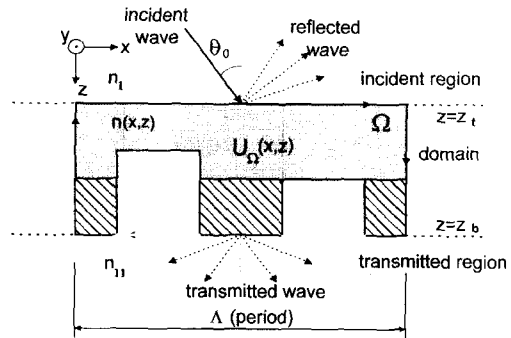


그림 2. 전체 계산영역에서의 투명경계조건과 주기적인 경계조건의 적용

Fig. 2. Application of the periodic and the transparent boundary conditions to the overall domain.

마스크의 주기성으로부터 전체 계산영역  $\Omega$  의 왼쪽과 오른쪽 경계 위의 노드에 대해 정의된 전기장과 법선 편도함수  $u, q$  는 서로 일정한 관계를 가질 것이다. 즉, 왼쪽과 오른쪽 경계에 정의된 전기장 값은 서로 같을 것이며, 법선 편도함수는 크기는 같으나 부호가 반대인 관계를 가질 것이다. 이를 주기적인 경계조건(periodic boundary condition)이라 하며, 이를 통해 왼쪽과 오른쪽 경계에서 서로 대응하는 노드에 정의된 미지수들을 반으로 줄일 수 있다.

$$\therefore u(L) = u(R) = u, \quad q(L) = -q(R) = q \quad (8)$$

위 식에서 대문자  $L$  과  $R$  은 각각 계산영역의 왼쪽 과 오른쪽 경계상의 서로 대응하는 점을 의미한다. 그러나, 조명광이 각도  $\theta_0$  로 사입사한다면 식 (8)은 더 이상 만족될 수 없으며 사입사에 따른 효과를 고려해 주어야 한다. 식 (6)의 관계로부터 이러한 효과를 보정한 결과는 아래와 같이 주어진다.

$$\therefore u(L) = \gamma u(R), \quad q(L) = -\gamma q(R) \quad (9)$$

$$\gamma = \exp[j\alpha^{(0)}L] \quad (10)$$

한편, 식 (5)의 미지수를 줄이기 위한 두 번째 경계 조건으로 투명 경계조건(transparent boundary condition) 이 있다. PSM 위쪽으로부터 조명광이 입사되므로, 입사 영역에서의 전기장은 입사광과 PSM으로부터 반사된 반사광의 합으로 표현될 수 있다. 그런데, 전기장과 자기장에 관한 연속조건에 따라,  $z = z_i$ 에서 이들 표현은 위쪽 경계의 각 노드에 정의된 전기장 및 법선 편도함수의 법선 성분과 같아야 한다. 이를 이용하여 위쪽 경계에 대한 투명 경계조건을 구성함으로써 미지수의 수를 반으로 줄일 수 있다. 즉, TE 편광인 경우, 전기장은 법선 성분( $y$  축 성분)만을 가지므로, 입사 영역에 존재하는 전기장과 법선 편도함수 표현식에  $z = z_i$  를 대입한 결과,  $u|_{Top}, q|_{Top}$  는 위 경계의 각 노드에 정의된 전기장  $u_{\Omega}(x, z_i)$  와 법선 편도함수  $q_{\Omega}(x, z_i)$  와 같을 것이다.

$$u_{\Omega}(x, z_i) = u|_{Top}, \quad q_{\Omega}(x, z_i) = q|_{Top} \quad (11)$$

$$u|_{Top} = \sum_s E_I^{(s)} e^{-j(\alpha^{(s)}x + \beta_I^{(s)}z_i)} + \sum_s E_R^{(s)} e^{-j(\alpha^{(s)}x - \beta_I^{(s)}z_i)} \quad (12)$$

$$q|_{Top} = \sum_s j\beta_I^{(s)} e^{-j\alpha^{(s)}x} \{ E_I^{(s)} e^{-j\beta_I^{(s)}z_i} - E_R^{(s)} e^{j\beta_I^{(s)}z_i} \} \quad (13)$$

여기서  $E_I, E_R$  는 각 회절 차수에 따른 입사광과 반사광의 복소진폭,  $k_i$  는 입사 영역에서의 파동 벡터 크기를 나타낸다. 식 (11)의 관계를 정리하면,

$$q_{\Omega}(x, z_i) = \vec{b}_i - \sum_s j\beta_I^{(s)} \left( \frac{e^{-j\alpha^{(s)}x}}{\Lambda} \right) \cdot \sum_e \int_{\Omega_e} [\phi_1, \phi_2] \begin{bmatrix} u_e^f \\ u_e^s \end{bmatrix} e^{j\alpha^{(s)}x} dx \quad (14)$$

$$\vec{b}_i = \sum_s j\beta_I^{(s)} e^{-j\alpha^{(s)}x} \cdot 2E_I^{(s)} e^{-j\beta_I^{(s)}z_i} \quad (15)$$

와 같이 정리되며, 식 (14)의 오른쪽 항에서 선적분은 위쪽 경계에 놓인 경계요소들에 대해서만 수행된다. 식 (14)는 위쪽 경계에 놓인 노드 각각에 정의된 미지수  $u$  와  $q$  의 관계를 의미하므로, 이 결과로부터 위쪽 경계에 정의된 미지수를 반으로 줄일 수 있을 것이며, 아래쪽 경계에 대해서도 같은 방법으로 미지수를 줄일 수 있을 것이다.

2) 다중 영역(multi-zone)으로 구성된 계산영역

그림 2에서 볼 수 있듯이 전체 계산영역은 보통 단일 매질로 구성되지 않고 서로 다른 굴절률을 가진 영역들의 조합으로 주어진다. 그런데, 경계요소법은 동일한 굴절률로 구성된 영역에 대해서만 적용 가능하므로, 여러 가지 매질로 구성된 전체 계산영역의 경우는 동일한 매질로 구성된 개별 영역(zone)으로 전체 계산영역  $\Omega$  를 분할하고, 각 개별 영역에 경계요소법을 적용해 주어야 한다. 이로 인해 개별 영역이 서로 중첩되는 경계에서는 한 노드(interface node, 이하 경계노드라 함)에 두 가지보다 더 많은 미지수가 정의되므로, 연속조건을 이용하여 미지수의 수를 줄여야만 한다.

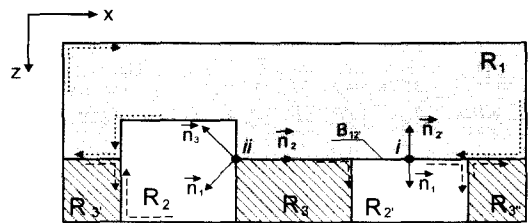


그림 3. 6개의 영역으로 구성되어진 다중영역 내에서의 경계노드들의 처리

Fig. 3. Treatment of interface nodes within the multi-zone which consists of six zones.

그림 3은 6개의 영역  $R_1, R_2, R_3, R_2', R_3', R_3''$  으로 구성된 전체 계산영역 즉 PSM 구조를 보여주고 있다. 예를 들어 영역  $R_1$  과  $R_2'$  에 의하여 공유되고 있는 경

계  $B_{12}'$  위의 노드  $i$ 를 생각해 보자. 개별 영역  $R_1$ 에 대해 경계요소법을 적용하는 과정에서 노드  $i$ 에 대해 전기장  $u_i(R_1)$ 과 법선 편도함수  $q_i(R_1)$ 라는 두 가지 미지수가 정의되며, 개별 영역  $R_2'$ 에 대해 경계요소법을 적용하는 과정에서 같은 노드에 또 다시  $u_i(R_2')$ 와  $q_i(R_2')$ 라는 두 가지 미지수가 정의된다. 그런데 노드  $i$ 는 사실 공간상의 동일한 점이므로 노드  $i$ 에 정의된 두 종류의 미지수들은 연속조건을 만족해야만 할 것이다. 법선 편도함수의 방향성을 고려하면,

$$\begin{aligned} u_i(R_1) &= u_i(R_2') = u_i \\ q_i(R_1) &= -q_i(R_2') = q_i \end{aligned} \tag{16}$$

의 관계가 성립되어야 하며, 이로부터 동일 경계노드에 정의된 4가지 미지수를 반으로 줄일 수 있게 된다. 식 (16)은 경계  $B_{12}'$  위의 노드뿐만 아니라, 두 가지 개별 영역이 중첩되는 나머지 경계에 대해서도 적용될 수 있을 것이다.

한편, 세 개의 개별 영역  $R_1, R_2, R_3$ 에 의하여 공유되는 노드  $ii$ 의 경우에도 연속조건에 의해 동일 노드에 정의된 미지수의 수를 줄일 수 있다. 먼저, 각 개별 영역별로 노드  $ii$ 에 정의되는 미지수 중에서 전기장은 동일한  $y$  축 성분만을 가지므로

$$u_{ii}(R_1) = u_{ii}(R_2) = u_{ii}(R_3) = u_{ii} \tag{17}$$

의 관계가 성립된다. 그러나, 동일 노드  $ii$ 에 대해 개별 영역별로 정의되는 법선 편도함수  $q_{ii}(R_1), q_{ii}(R_2), q_{ii}(R_3)$ 는 각각  $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \mathbf{n}_3$ 의 방향을 가지므로, 이를 고려하여 3가지 법선 편도함수들의 관계를 얻어야 한다. 연속조건을 활용하여 그들의 관계를 구하면,

$$q_{ii}(R_1) = \frac{(\mathbf{n}_3 \times \mathbf{n}_1) \cdot \mathbf{a}_y q_{ii}(R_2) - (\mathbf{n}_2 \times \mathbf{n}_1) \cdot \mathbf{a}_y q_{ii}(R_3)}{(\mathbf{n}_3 \times \mathbf{n}_2) \cdot \mathbf{a}_y} \tag{18}$$

와 같다. 식 (18)에서  $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \mathbf{n}_3$ 는 각 영역에 대한 단위 법선 벡터이다.

### 3. Aerial image 계산 과정 및 flow chart

앞에서 기술된 경계요소법에 의해 PSM과 조명광의 상호작용을 계산하는 모듈(이하 BEM 모듈이라 함)을 개발하였으며, PSM의 aerial image를 계산하기 위해

본 연구실에서 이미 개발한 LG-AIS 모듈<sup>[6]</sup>과 통합하였다. 통합된 프로그램을 이용하여 PSM의 aerial image를 계산하는 과정은 그림 4의 흐름도(flow chart)와 같다.

먼저, 시뮬레이션에 필요한 수치 구경(NA), 배율, 입사광의 파장, 편광상태 등과 같은 각종 공정 변수들과 PSM의 구조에 대한 자료가 입력되면, LG-AIS 모듈에서는 source discretization technique<sup>[6]</sup>에 의해 PSM에 입사하는 조명광에 대한 정보를 생성한다. 한편, 배위 생성기에 의해 입력된 PSM에 관한 정보로부터 전체 계산영역  $\Omega$ 가 정의되고 동일 굴절률로 구성되는 개별 영역의 경계와 노드가 설정된다. 이들 정보와 조명광에 관한 정보는 BEM 모듈에 입력되는데, 이를 이용하여 식 (4)의 연립 방정식을 구성하고 식 (9), (14), (16), (17), (18)의 관계를 이용하여 미지수의 수를 축소한 후, 최종적인 연립방정식을 구성한다. 연립방정식의 해는 적절한 matrix solver에 의해 구하며, 이 결과는 PSM을 투과한 빛의 표현이 된다. 투과광의 표현은 공간 주파수 성분별로 주어지며 이 결과를 다시 LG-AIS 모듈에 넘겨 최종적인 aerial image를 계산하게 된다.

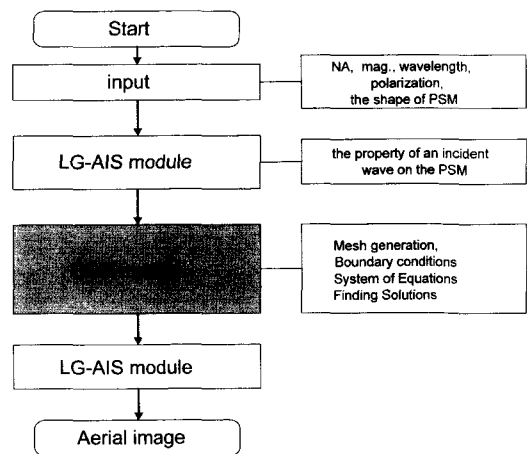


그림 4. BEM 모듈의 흐름도  
Fig. 4. Flow chart of BEM module for simulating the aerial image of a given mask.

## III. BEM 모듈의 검증

광 리소그래피 시뮬레이션에서는 마스크가 주기적으로 배열되어 있다는 가정 하에서 aerial image를 계산하므로, 조명광과 PSM의 상호작용을 빛과 회절격자의

상호작용으로 간주할 수 있을 것이다. 그러므로, 회절 격자의 회절 효율을 계산하는 RCWA 결과<sup>[16]</sup>로부터 BEM 모듈의 정확성을 검증할 수 있을 것이다. 이를 위해 굴절률이 다른 두 가지 유전체가 주기적으로 반복되어 있는 구조와 유전체와 금속 매질이 주기적으로 반복되는 구조 각각에 대해 RCWA에 의해 계산된 회절 효율과 BEM 모듈에 의한 계산 결과를 비교하였고, 그 결과 0.1% 이내에서 두 결과가 일치함을 확인할 수 있었다. 이때 광원의 파장은  $0.248\mu\text{m}$ 이고 경계요소의 길이(이하 메쉬 크기라 함)는  $0.02\mu\text{m}$ 이며, TE 편광을 가정하였다.

경계요소법을 다중 영역으로 구성된 전체 계산영역에 적용하는 경우, 경계노드의 처리는 계산의 정확성에 큰 영향을 미친다. 그러므로 그림 5(a)에 제시되어 있는 굴절률이 1.508인 유리로 이루어진 균일한 계산영역을 그림 5(b)와 같이 인위적으로 수평 혹은 수직으로 2, 3개의 영역으로 나누어 그 투과율을 계산함으로써 각 경우에 발생하는 경계노드들의 처리가 정확하게 수행되는지를 확인하였다. 만일 경계노드를 정상적으로 처리한다면, 계산 결과는 계산영역을 다중 영역으로 분할하는 것과는 무관하여야 할 것이다. 파장을  $0.248\mu\text{m}$ , 편광을 TE라 가정하여 메쉬 크기를 변화시키면서 계산영역을 단일 영역으로 정의하였을 때와 다중 영역으로 정의하였을 때의 투과율을 그림 6에 나타내었다. 그림에서 메쉬 크기가  $0.024\mu\text{m}$  이상인 경우는 계산영역을 단일 영역으로 정의한 경우와 다중 영역으로 정의한 경우에 대한 투과율이 큰 차이를 보여 그 일치성을 논할 수 없지만,  $0.024\mu\text{m}$  이하의 메쉬 크기에서는 모든 경우에 대해 투과율이 0.4%의 오차범위 내로 투과율이 서로 일치함을 볼 수 있다. 이로부터 경계노드에 관한 연속 조건이 제대로 처리됨을 알 수 있다.

그림 6에서 메쉬 크기가  $0.025\mu\text{m}$  이상에서 투과율이 큰 차이를 보이는 이유는 경계요소법에서 도입된 Green 함수와 관련된 것이다. 수치 해석적으로 식 (2)의 선적분을 수행하기 위해 Green 함수로 사용된 Hankel 함수를 급수로 전개하는데, 이 때 경계요소의 길이  $l_e$ 가 광원의 파장에 비해 0.1 배 이하가 되어야만 급수 표현이 급격히 수렴하게 되어<sup>[10]</sup>, 수치 적분 결과의 정확성을 기대할 수 있다. 즉, 광원의 파장이  $0.248\mu\text{m}$ 인 경우, 경계요소의 길이  $l_e$ 가  $0.0248\mu\text{m}$  이하가 되어야만 정확한 계산 결과를 얻게 될 것이다.

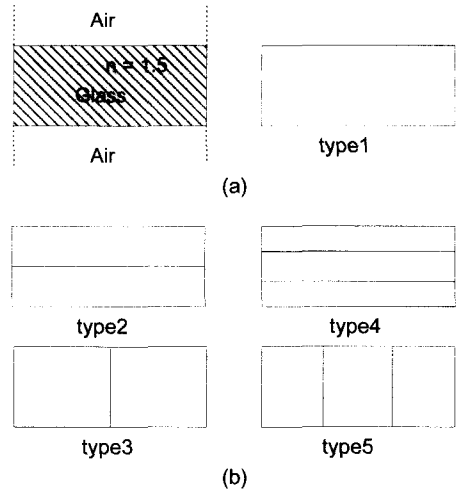


그림 5. (a) 균일한 매질로 구성된 전체 계산영역 (b) 다중영역으로의 분할 형태  
Fig. 5. (a) The overall domain composing of a homogeneous material and (b) its division into the multi-zones.

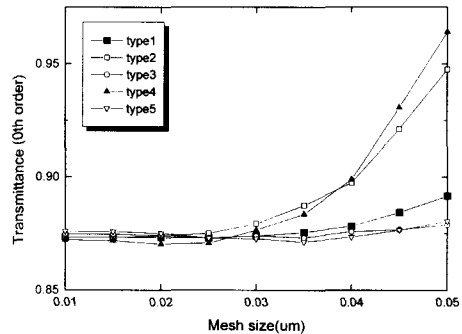


그림 6. 단일영역과 다중영역으로 정의된 계산영역에서 메쉬 크기 변화에 따른 투과율의 수렴  
Fig. 6. Convergence of transmittance with the mesh size for the single and the multi-zone problems.

#### IV. 경계요소법을 이용한 Aerial image 계산

1. 기존 문헌과의 비교  
참고문헌 [1]에는 두 개의 개구부를 가지며 개구부와 그사이의 폭이 동일한 마스크(line & space, 이하 L/S 라함)에 대하여 유한요소법을 이용하는 Emflex, waveguide

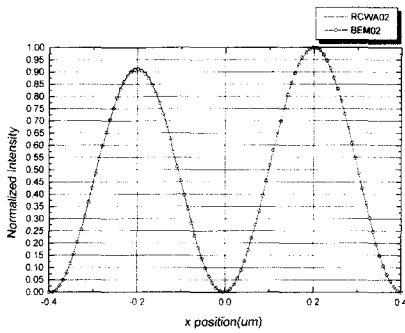
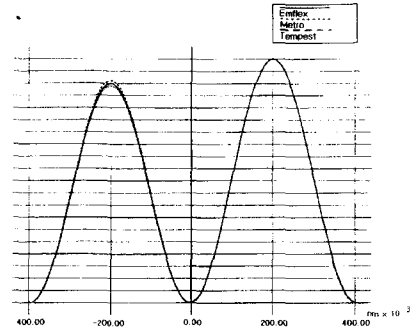
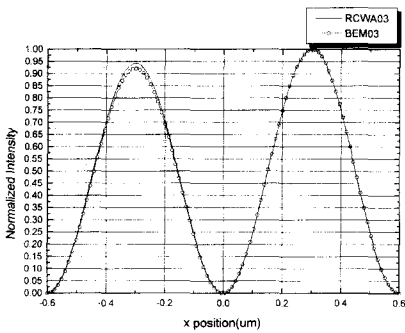
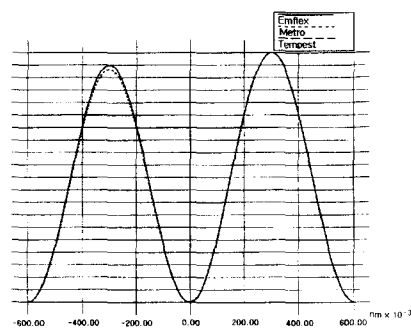
(a)  $L/S = 0.2 \mu\text{m}$ (b)  $L/S = 0.2 \mu\text{m}$ (c)  $L/S = 0.3 \mu\text{m}$ (d)  $L/S = 0.3 \mu\text{m}$ 

그림 7. 참고문헌 [1]의 전산시뮬 결과와 BEM에 의한 결과와의 비교

Fig. 7. Comparison of simulated aerial images. (a), (c) are obtained from three vector simulator : Emflex, Metropole, Tempest<sup>[1]</sup> and (b), (d) are obtained from RCWA and BEM modules of LG-OLiS.

method(RCWA와 동일함.)를 이용하는 Metropole, 유한 차분법을 이용하는 Tempest의 세 가지 계산 결과가 제시되어 있는데, 경계요소법을 이용한 aerial image 계산 과정을 객관적으로 검증하기 위하여 동일한 조건에서 BEM 모듈에 의한 aerial image를 계산하여 참고 문헌 [1]의 결과와 비교하였다.

그림 7 (a),(b)는  $L/S = 0.2 \mu\text{m}$ 인 경우의 계산 결과를, (c),(d)는  $0.3 \mu\text{m}$ 인 경우의 계산 결과를 각각 나타내고 있는데, 그림에서 알 수 있듯이 경계요소법에 의한 계산 결과는 문헌 결과와 약 1%의 오차 범위 안에서 일치하고 있음을 알 수 있다. 이것은 메쉬 크기가  $0.02 \mu\text{m}$ 일 때의 결과로서, 메쉬 크기가 작아질수록 오차는 더욱 작아짐을 확인하였다.

## 2. 계산 결과의 수렴성 및 시간 비교

전술한 바와 같이 경계요소법은 주어진 문제의 차원

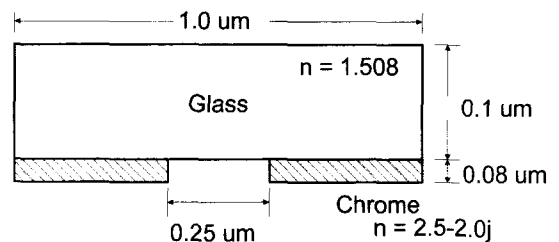


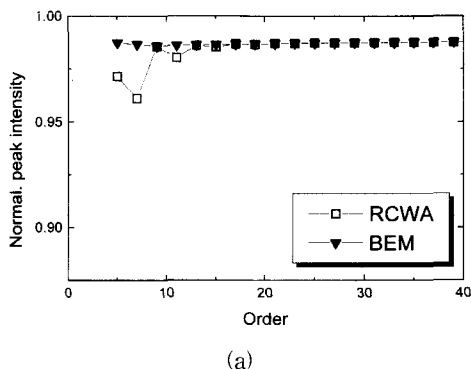
그림 8. 시뮬레이션에 사용된 마스크의 개략도

Fig. 8. The schematic diagram of a binary mask used for confirming the effectiveness of the boundary element method.

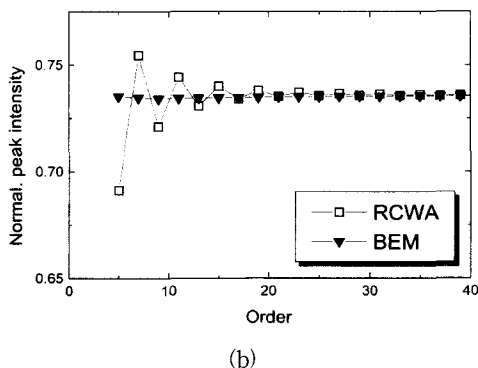
을 한 차원 낮출 수 있으므로, 계산 량을 크게 줄일 수 있는 이점을 갖는다. 이를 확인하기 위해, 그림 8과 같은 마스크를 정의하고 이 마스크의 aerial image와 계산에 소요되는 시간을 각각 구하였으며, 이를 RCWA의



결과와 비교하였다. 식 (12)의 경계조건을 경계요소법에 적용할 때, 최대 회절 차수(s)를 유한한 값으로 설정하여야 하는데, 이 때 고려되는 최대 회절 차수는 계산의 정확도와 계산 시간에 영향을 미치게 된다. 또한, RCWA의 경우도 계산영역 내부의 전기장을 표현하는 과정에서 같은 의미의 회절 차수를 고려하게 되므로, 경계요소법의 결과와 RCWA의 결과를 고려하는 최대 회절 차수에 따라 비교하였다.



(a)



(b)

그림 9. (a) TE 편광과 (b) TM 편광에 대하여 RCWA와 BEM 모듈에 의해 계산된 image들의 peak intensity 변동

Fig. 9. The variation of the peak intensity in aerial images calculated from the RCWA and the BEM modules for (a) TE and (b) TM polarizations.

그림 9 (a), (b)는 각각 TE와 TM 편광에 대해 최대 회절 차수에 따른 aerial image의 최고 세기(peak intensity) 변화를 비교한 것이며 그림 10은 최대 회절 차수에 따른 계산 시간의 증가를 나타낸 것이다. 그림 9에서 RCWA의 결과를 보면 고려하는 최대 회절 차수에 따라 최고 세기가 진동하는데, TM 편광의 경우 이

러한 경향은 더욱 심각해짐을 확인할 수 있다. 이로 인해 RCWA에서는 안정된 수렴 값을 얻기 위해 경계요소법보다 최대 차수를 크게 설정해야할 필요가 있으며, 그림 8과 같은 마스크 구조에 대해서는 대략 40 이상이 요구된다. 한편, 그림 10으로부터 경계요소법의 경우 계산 시간이 최대 회절 차수에 따라 크게 변하지 않지만, RCWA의 경우는 최대 차수에 따라 계산 시간이 기하급수적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 경계요소법에서의 회절광의 차수가 투명 경계조건 적용과 계산 결과로부터 투과광의 세기를 결정하는 과정에만 영향을 줄뿐 계산시간의 대부분을 소비하는 연립 방정식 풀이에서의 미지수의 갯수와는 무관하기 때문이다.

이상의 결과를 종합하면, RCWA에 비해 경계요소법은 보다 작은 회절 차수만으로도 안정된 해를 얻을 수 있으므로, 계산 시간 측면에서 상당한 이점을 가질 수 있을 것이다. 이러한 계산 시간과 메모리 양에 관한 BEM 모듈의 이점은 계산영역이 2차원에서 3차원으로 확장된다면 더욱 더 커질 것이라고 판단된다.

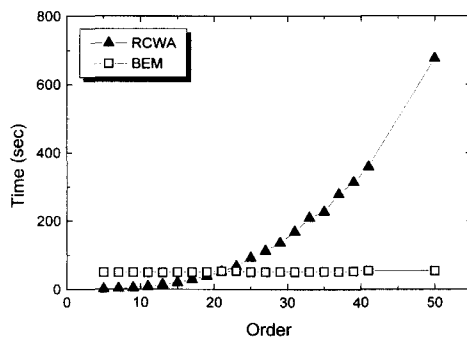


그림 10. 최대 회절 차수에 따른 RCWA와 BEM 모듈에 의한 계산 시간의 비교

Fig. 10. The comparison fo calculation time used by RCWA and BEM module.

### 3. 위상변이 마스크의 단차 효과 분석

구현된 BEM 모듈을 이용하여 그림 11(a)와 같은 마스크에 대하여 d에 따른 단차 효과를 전산 시뮬하였다. 전산 시뮬에 사용된 광원의 파장은 0.248 $\mu\text{m}$ 이고 5:1 축소 투영으로 정의하였으며 마스크는 0.175 $\mu\text{m}$ 의 L/S를 전이할 수 있도록 하였다. 그림에서 두께 d1은 두 개구부(opening) 간의 위상 변이가 180°가 될 수 있도록 고정하였다.

d가 0일 때 PSM의 대표적인 단차 효과인 두 개구부간의 세기의 불일치를 볼 수 있었으며 그 차이는 TE

편광에 대해 약 8.21%이었다. 이 개구부간의 세기 차이는 전이될 선평에도 영향을 미쳐 40%의 threshold resist model<sup>[17]</sup>을 가정하여 그 선평을 계산한 결과 약 0.013 $\mu\text{m}$  작게 전이됨을 예측할 수 있었는데 이러한 차이는 특정  $d$ 만큼 추가적인 비등방성 에칭 공정을 실시하여 없앨 수 있음을 그림 11(b)에 나타내었다. TE 편광의 경우  $d$ 는 약 0.28405 $\mu\text{m}$ 이다.

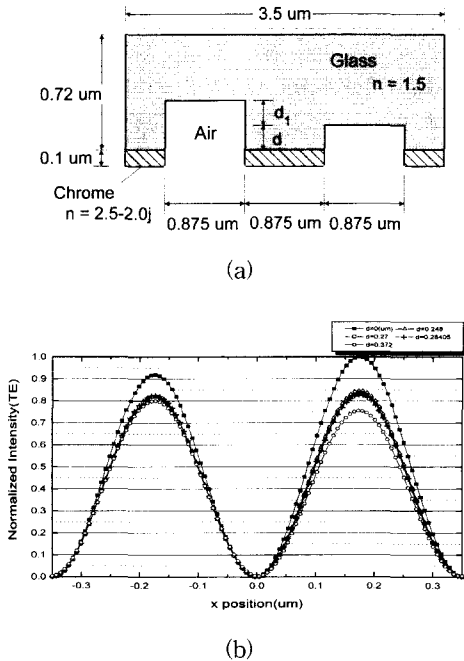


그림 11. (a) Dual trench PSM의 구조  
(b) TE 편광시 shallow trench 깊이  $d$ 의 변화에 따른 aerial image의 변화  
Fig. 11. (a) The structure of a trench PSM and (b) dependency of aerial images on the shallow trench depth,  $d$  for TE polarization.

또한, 그림 11(a)의 마스크와 같은 line & space를 갖지만 다수의 layer로 제작된 PSM(이하 multi-layer PSM)<sup>[18]</sup>를 정의하여 전산 시뮬하였다. 전산 시뮬에 사용된 multi-layer PSM은 그림 12(a)에 나타내었다. 이 multi-layer PSM 역시 단차 효과로 인하여 두 개구부간의 약 8.11%의 세기 차이를 볼 수 있었으므로 이 차이를 없애기 위하여 위상 변이부의 크기  $L$ 을 변화시켜 원하는 패턴의 크기를 얻는 mask biasing 법<sup>[21]</sup>을 사용하여 전산 시뮬을 실시하였고 그 결과를 그림 12(b)에 나타내었다. 그림에서  $\Delta L$ 은 변경 후의 개구부의 크기에서 변경 전의 개구부의 크기를 뺀 값을 의미하며

음의 값은 변경 전의 크기에 비하여 그만큼 줄어들었음을 의미하는데 TE 편광시 위상 변이부의 개구부 크기를 0.035  $\mu\text{m}$ 만큼 크게 함으로써 두 지역간의 세기 차이를 완전히 줄일 수 있음을 알 수 있다.

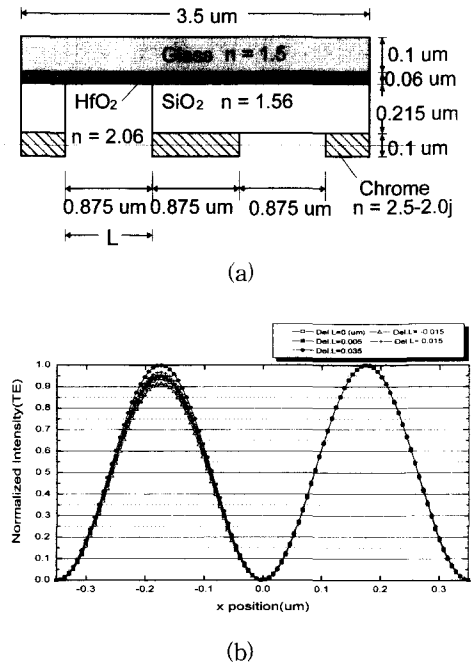


그림 12. (a) 다층 PSM의 구조  
(b) TE 편광시  $L$ 의 크기에 따른 aerial image 변화  
Fig. 12. (a) The structure of a multi-layer PSM and (b) variation of aerial images as function of  $L$  for the TE polarization.

V. 결론

본 논문에서는 PSM의 단차 효과를 고려하기 위해 사용되었던 RCWA의 문제점을 개선하고자, 광 리소그래피 공정 시뮬레이션에 경계요소법을 새로이 적용하였다. 전체 영역에 걸쳐 투명 경계조건과 주기적인 경계조건을, 내부의 경계노드들에 대해서는 연속조건을 적용함으로써, 경계요소법에 의한 BEM 모듈을 구현할 수 있었으며 이를 통해 RCWA가 갖는 해의 수렴성, 계산 시간의 증가 문제를 개선할 수 있었다.

파장이 0.248 $\mu\text{m}$ 인 경우, 매쉬 크기가 0.024 $\mu\text{m}$  이하로 유지된다면, BEM 모듈의 계산 결과는 절대 오차 0.1% 이내에서 해석적인 결과와 일치함을 확인하였으

며, 다중 영역도 적절히 취급함을 확인하였다. 또한, 계산된 aerial image를 기존 문헌의 결과와 비교하여 매쉬 크기  $0.02\mu\text{m}$ 에서 약 1%의 오차 범위 내로 일치함을 보여 계산의 정확도를 객관적으로 검증하였다. 한편, RCWA-AIS 모듈과 BEM 모듈에 의한 계산 시간과 해의 수렴성을 비교하여 경계요소법이 계산 시간과 메모리 면에서 결상 해석에 더 효율적임을 보였다. 끝으로 BEM 모듈을 이용하여 PSM과 multi-layer PSM의 최적 설계과정을 제시하였으며 이를 통해 마스크 설계시 고려되어야 할 사항에 대하여 알아보았다.

실제 공정에 사용되는 마스크는 3차원 구조이므로 3차원 영역의 결상 해석을 위해 경계요소법을 확장할 필요가 있으며, 이러한 경우 경계요소법에 의한 결상 해석이 RCWA에 의한 해석보다 더 효율적일 것으로 기대된다. 또한 경계요소법은 PSM의 단차 효과뿐만 아니라, 노광 공정에서 포토레지스트 내부의 세기 분포를 전산 시뮬하는 데도 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 한편, 웨이블릿 변환(wavelet transform)을 이용하면 좀 더 효과 적인 계산을 수행할 수 있을 것이므로 이에 대한 연구도 필요하다.

### 참 고 문 헌

- [ 1 ] K. D. Lucas, A. J. Strojwas, K. K. Low, and Chi-Min Yuan, "Intensity optimization for phase-shifting Masks", SPIE. vol.1927, pp. 438-449, 1993.
- [ 2 ] C. Pierrat, A. Wong, and S. Vaidya, "Phase-shifting mask topography effects on lithographic image quality", SPIE vol.1927, pp. 28-41, 1993.
- [ 3 ] M. G. Moharam and T. K. Gaylord, "Rigorous coupled-wave analysis of planar grating diffraction", J. Opt. Soc. Am vol. 71, no. 7, pp. 811-818, 1981.
- [ 4 ] M. G. Moharam and T. K. Gaylord, "Diffraction analysis of dielectric surface-relief gratings", J. Opt. Soc. Am vol. 72, no. 10, pp. 1385-1392, 1982.
- [ 5 ] P. Lalanne, and G. M. Morris, "Highly improved convergence of the coupled-wave method for TM polarization", J. Opt. Soc. Am, vol. 13, no. 4, pp. 779-784, 1996.
- [ 6 ] C. Seo, S. G. Lee, J. Lee, "Development of an integrated 3D litho- graphy simulator", SPIE vol. 3334, pp. 777-784, 1998.
- [ 7 ] E. B. Becker, G. F. Carey, and J. T. Oden. *Finite Elements An Introduction : Volume 1*, Prentice Hall, pp.175-221, 1981.
- [ 8 ] M. J. Fagan, *Finite Element Analysis : Theory and Practice*, Longman, pp. 39-84, 1992.
- [ 9 ] A. K. Wong and A. R. Neureuther, "Polarization effects in mask transmission", SPIE vol. 1674, pp. 193-200, 1992.
- [ 10 ] K. Tanaka and M. Kojima, "New boundary integral equations for computer-aided design of dielectric waveguide circuit", J. Opt. Soc. Am, A vol. 6, no. 5, pp. 667-674, 1989.
- [ 11 ] M. Tanaka and K. Tanaka, "Boundary integral equations for computer-aided design and simulation of near-field optics : two-dimensional optical manipulator", J. Opt. Soc. Am., A vol. 15. no. 1, pp. 101-108, 1998.
- [ 12 ] S. Kagani and I. Fukai, "Application of boundary-element method to electromagnetic field problems", IEEE, Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-32, no. 4, pp. 455-461, 1984.
- [ 13 ] J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, 3rd edition, John Wiley & Sons Inc., New York, pp. 35-40, 1998.
- [ 14 ] A. A. Becker, *The Boundary element method in Engineering-A complete course*, McGraw-Hill, London, pp. 6-90, 1992.
- [ 15 ] J. Trevelyan, *Boundary Elements for Engineers-Theory and Applications*, Computational Mechanics Pub. Co., pp. 49-175, 1994.
- [ 16 ] 김태환, "Rigorous coupled wave analysis를 이용한 미세 광소자의 회절 및 편광 특성에 관한 연구", 석사학위 청구논문, 인하대학교 1995
- [ 17 ] T. A. Brunner and R. A. Ferguson, "Approximate models for resist processing effects", SPIE vol. 2726, pp. 198-206, 1996.
- [ 18 ] T. C. Chieu, K. K. Shin and D. B. Dove, "Fabrication of phase shifting mask employing multi-layer films", SPIE vol. 2197, pp. 181-193, 1994.

## 저 자 소 개

## 李 東 勳(正會員)

1970년 12월 3일생. 1993년 인하대학교 전자재료공학과 졸업(공학사). 1999년 인하대학교 전자전기컴퓨터공학부 반도체 전공(공학석사) 주관심분야는 반도체 소자 및 공정시뮬레이션 등임

## 李 升 杰(正會員)

1960년 1월 5일생. 1982년 인하대학교 응용물리학과(공학사) 1984년 한국과학기술원 물리학과(이학석사) 1987년 한국과학기술원 물리학과(이학박사) 1987년~1991년 인하대학교 응용물리학과 조교수 1991년~1992년 미국 Northwestern 대학 교환교수 현재 인하대학교 공과대학 전자전기컴퓨터공학부 교수 주관심분야는 광리소그래피 공정의 개선과 시뮬레이터 개발, 전자 소자와 광소자의 접목등임

## 金 顯 俊(正會員)

1969년 9월 19일생. 1998년 인하대학교 전자재료공학과 졸업(공학사) 1998년~현재 인하대학교 전자전기컴퓨터공학부 석사과정(반도체 전공). 주관심분야는 반도체 소자 및 공정시뮬레이션 등임

## 李 鐘 雄(正會員)

1961년 8월 20일생. 1983년 2월 서울대학교 사범대학 물리교육과 졸업. 1985년 2월 한국과학기술원 물리학과(이학석사). 1988년 2월 한국과학기술원 물리학과(이학박사). 현재 청주대학교 공과대학 광학공학과 부교수. 주관심분야는 광학계의 설계 및 평가 및 결상이론 등임