



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

2024년 2월

석사학위 논문

포토레지스트 모델 파라미터 측정
및 현상 공정 후 포토레지스트
형상 시뮬레이션에 관한 연구

조선대학교 대학원

광기술공학과

박승태

포토레지스트 모델 파라미터 측정
및 현상 공정 후 포토레지스트
형상 시뮬레이션에 관한 연구

A Study on the Measurement of Photoresist
Model Parameters and
Simulation of Developed Photoresist Profile

2024년 2월 23일

조선대학교 대학원

광 기술 공 학 과

박 승 태

포토레지스트 모델 파라미터 측정
및 현상 공정 후 포토레지스트
형상 시뮬레이션에 관한 연구

지도교수 박종락

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2023년 10월

조선대학교 대학원

광기술험공학과

박승태

박승태의 석사학위논문을 인준함

위원장 권 민 기 (인)

위 원 박 종 락 (인)

위 원 안 태 정 (인)

2023년 12월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제1장 서 론	1
제2장 포토레지스트의 개요 및 종류	3
제1절 포토레지스트의 개요	3
제2절 포토레지스트의 종류	4
1. Novolak/DNQ 포토레지스트	4
2. 화학중폭형 포토레지스트(CAR)	4
가. KrF 포토레지스트	5
나. ArF 포토레지스트	5
다. 극자외선(EUV) 포토레지스트	6
제3장 이론적 배경	7
제1절 노광 공정에 대한 Dill 모델	7
제2절 현상 공정에 대한 Mack 모델	8
제3절 포토레지스트 형상 시뮬레이션을 위한 광선추적법	9
제4절 레이저 직접 묘화 시스템의 에어리얼 이미지	10
제4장 결과 및 논의	13

제1절 포토레지스트 샘플 준비	13
제2절 포토레지스트의 특성 측정	14
1. Dill 모델 파라미터 측정	14
2. Mack 모델 파라미터 측정	15
제3절 포토레지스트 형상 시뮬레이션	24
1. 예비 시뮬레이션	24
2. 측정된 픽셀 이미지를 사용한 시뮬레이션	25
제5장 결론	40
[참고문헌]	41

표 목차

표 1 노광량에 따른 포토레지스트 샘플의 투과율 측정 결과	17
표 2 본 논문에서 결정한 포토레지스트(AP2205B)의 Dill 및 Mack 모델 파라미터	18

그림 목차

그림 1 흡수계수 측정 결과	19
그림 2 (a) 노광률 상수 C 의 변화에 따른 평균 제공근 오차, (b) 측정 및 계산된 투과율 비교(평균 제공근 오차가 최소인 경우: $C = 6.209 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{mJ}$)	20
그림 3 (a) 노광을 하지 않은 샘플과 (b) 충분히 노광한 샘플의 현상 시간에 따른 포토레지스트 잔여 두께	21
그림 4 (a) 용해 선택도 파라미터 n 의 변화에 따른 평균 제공근 오차, (b) 측정 및 계산된 포토레지스트 두께 비교(평균 제공근 오차가 최소인 경우: $n = 1.2170$)	22
그림 5 (a) 파라미터 a 와 용해 선택도 파라미터 n 의 변화에 따른 평균 제공근 오차, (b) 측정 및 계산된 포토레지스트 두께 비교(평균 제공근 오차가 최소인 경우: $a = 3.10$, $n = 1.380$)	23
그림 6 현상 공정 후의 포토레지스트 형상 시뮬레이션 과정	27
그림 7 톱니 패턴과 가우시안 픽셀 이미지의 합성곱을 사용하여 계산한 에어리얼 이미지($\lambda = 105 \mu\text{m}$, $\omega_0 = 2.5 \mu\text{m}$)	28
그림 8 예비 시뮬레이션에 사용된 (a) 포토레지스트의 용해 속도 R 의 분포, (b) 현상 경로에 대한 굴절률 n_R 의 분포	29
그림 9 예비 시뮬레이션 조건에 대한 (a) 현상 광선의 궤적, (b) 현상 시간별 포토레지스트의 형상 시뮬레이션 결과	30
그림 10 측정된 MLT 시스템의 픽셀 이미지: (a) 최상 초점 조건, (b) 불량 초점 조건	31
그림 11 주기가 100 pixel인 톱니 패턴에 대한 (a) 패턴 데이터, (b) 노광 데이터	32
그림 12 최상 초점 조건 픽셀 이미지를 사용하였을 때 주기가 100 pixel인 톱니 패턴에 대한 에어리얼 이미지	33
그림 13 최상 초점 조건 픽셀 이미지를 사용하였을 때 주기가 100 pixel인 톱니 패	

턴에 대한 (a) 포토레지스트의 용해 속도 R 의 분포, (b) 현상 경로에 대한
 굴절률 n_R 의 분포 34

그림 14 최상 초점 조건 픽셀 이미지를 사용하였을 때 현상 시간별 포토레지스트
 의 형상 시뮬레이션 결과. (a) 주기: 100 pixel, (b) 주기: 80 pixel, (c) 주
 기: 60 pixel, (d) 주기: 40 pixel, (e) 주기: 20 pixel, (f) 주기: 10 pixel .. 35

그림 15 최상 초점 조건 픽셀 이미지를 사용하였을 때 포토레지스트 형상 시뮬레
 이션 결과(현상 시간: 120 s). (a) 주기: 100 pixel, (b) 주기: 80 pixel, (c)
 주기: 60 pixel, (d) 주기: 40 pixel, (e) 주기: 20 pixel, (f) 주기: 10 pixel
 36

그림 16 불량 초점 조건 픽셀 이미지를 사용하였을 때 포토레지스트 형상 시뮬레
 이션 결과(현상 시간: 120 s). (a) 주기: 100 pixel, (b) 주기: 80 pixel, (c)
 주기: 60 pixel, (d) 주기: 40 pixel, (e) 주기: 20 pixel, (f) 주기: 10 pixel
 37

그림 17 최상 초점 조건일 때 포토레지스트 형상 측정 결과(현상 시간: 120 s). (a)
 주기: 100 pixel, (b) 주기: 80 pixel, (c) 주기: 60 pixel, (d) 주기: 40 pixel,
 (e) 주기: 20 pixel, (f) 주기: 10 pixel 38

그림 18 최적 초점 조건 픽셀 이미지와 불량 초점 조건 픽셀 이미지를 측정 결과
 와 비교 39

ABSTRACT

A Study on the Measurement of Photoresist Model Parameters and Simulation of Developed Photoresist Profile

Seungtae Park

Advisor : Prof. Jong-Rak Park, Ph.D.

Department of Photonic Engineering

Graduate School of Chosun University

In this paper, the characteristics of a photoresist were measured using the Dill model for the exposure process and the Mack model for the development process. Parameters A and B of the Dill model were directly determined using the absorption coefficients measured from unexposed and sufficiently exposed photoresist samples. The last parameter, C , of the Dill model was indirectly determined by analyzing the error between the theoretically calculated and experimentally measured transmittance for various exposure values. The R_{\min} and R_{\max} parameters of the Mack model were directly determined based on the measured dissolution rates using unexposed and sufficiently exposed photoresist samples. The remaining parameters, a and n , of the Mack model were indirectly determined by analyzing the error between the theoretically calculated and experimentally measured photoresist thickness variation for various exposure values with development time. Essentially the same analysis method was applied to the reduced Mack model using only parameter n , revealing that the original model employing parameters a and n exhibited smaller errors compared to the reduced model.

Simulation of the photoresist profile after the development process was conducted using the ray tracing method. Measured pixel images were utilized for aerial image calculations in the simulation. Simulations for sawtooth patterns with various pitches(ranging from 21 μm to 210 μm) were performed and compared with experimental results, showing that as the pitch of the sawtooth pattern decreased, the height of the photoresist profile also decreased. The simulation results using the measured pixel image for the best focus condition were found to be in good agreement with the experimentally measured ones.

Based on the simulation methodology summarized in this paper and the measured characteristic parameters of the photoresist, further research on optical proximity effect correction (OPC) will be conducted as a follow-up study.

제1장 서론

오늘날 문명의 발전은 상당한 부분이 반도체 기술의 발달에 따라 이루어졌다. 반도체 칩은 컴퓨터, 휴대전화, 통신장비, 가전제품 및 다른 수많은 기기에서 필수적으로 사용된다. 반도체 산업은 현대 기술과 전자 제품의 핵심적인 구성 요소 중 하나로 자리 잡고 있으며 차세대 기술의 발전을 위한 기반 마련에 큰 역할을 한다. 이러한 반도체는 눈에 보이지 않을 정도로 작은 마이크로 또는 나노 단위의 미세한 회로 패턴으로 이루어져 있다. 미세 패턴을 만들기 위해 포토리소그래피(Photolithography) 기술^[1-3]이 사용되고 있다.

포토리소그래피는 마스크에 도면을 새긴 후 빛이 투과되는 영역만 웨이퍼에 찍어내는 기술로서 동일한 패턴을 얼마나 정확한 크기로 정확한 위치에 형성하는지가 중요하다. 반도체 회로는 다층으로 이루어져 있으므로 하나의 반도체 칩을 만드는 데 포토리소그래피 공정을 수십 번 거쳐야 하기 때문에 동일한 위치에 포토 공정을 실행하여야 정상적인 패턴이 형성된다. 포토리소그래피 공정 과정은 크게 코팅(Coating), 노광(Exposure), 현상(Development)으로 나눌 수 있다^[1,4].

먼저 코팅은 원하는 패턴을 새길 수 있는 물질인 포토레지스트(Photoresist)^[5-7]를 웨이퍼 기판 전체에 균일하게 도포하는 것을 의미하고 노광은 원하는 패턴의 마스크를 웨이퍼와 정렬한 후 빛을 사용하여 마스크의 패턴을 기판에 형성하는 공정이다. 마지막으로 현상은 현상액을 사용하여 노광된 영역과 노광되지 않은 영역을 선택적으로 제거해 회로 패턴을 형성하는 공정이다. 이러한 공정들에는 포토레지스트라는 물질이 중요시되는데 대부분의 포토레지스트에 패턴을 형성하는 과정은 노광 공정과 관련된 Dill 모델^[8-10]과 현상 공정과 관련된 Mack 모델^[11]을 사용하여 이론적으로 설명할 수 있다.

본 논문에서는 먼저 포토레지스트의 특성을 Dill 모델과 Mack 모델을 토대로 측정하였다. 측정된 모델 파라미터를 사용하여 현상 공정 후 형성된 포토레지스트의 형상에 대한 시뮬레이션을 수행하고 측정된 결과와 비교하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 반도체 포토리소그래피 공정에 사용되는 포토레지스트의 종류 및 특성을 소개하였고, 제3장에서는 포토레지스트의 특성을 측정하기 위해 사용된 Dill 모델과 Mack 모델, 현상 공정 후 형성된 포토레지스트의 형상을 시뮬레이션하기 위해 사용된 광선추적법에 대해 상세히 정리하였고,

제4장에서는 모델 파라미터 추정과 형상 시뮬레이션 결과에 대해 기술하였다. 마지막으로 제5장에 본 논문의 연구 결과를 간략히 요약하였다.

제2장 포토레지스트의 개요 및 종류

제1절 포토레지스트의 개요

포토리소그래피 공정에서 미세한 회로 및 구조를 정확하게 형성하기 위해 포토레지스트가 중요한 역할을 한다. 포토레지스트는 마스크를 통해 선택적으로 특정 부분에 빛이 닿게 되면 화학 반응을 일으켜 패턴이 형성되는 감광성 물질이다^[5-7]. 대표적으로 노광된 영역이 광화학반응에 의해 용해도가 증가하여 현상액에 의해 제거되는 양성(Positive) 포토레지스트와 노광된 영역이 교차결합에 의해 경화되어 용해되지 않고 빛이 닿지 않은 영역이 용해되는 음성(Negative) 포토레지스트가 있다^[5].

반도체 칩의 집적도를 향상시키기 위해 포토리소그래피 공정에 사용되는 광원의 파장이 점점 짧아지고 있다. 이러한 이유로 포토레지스트는 파장에 맞게 변화하였으며 특성도 다양하게 개발되었다. 대표적으로 I-line(365 nm), G-line(436 nm)에서 Novolak/DNQ(Diazonaphthoquinone) 포토레지스트^[12]가 사용되고, 이후 심자외선(Deep Ultraviolet, DUV) 파장에서는 화학증폭형 포토레지스트(Chemical Amplified Resist, CAR)가 주로 사용되게 되었다^[13]. 최근에는 극자외선(Extreme Ultraviolet, EUV)용 포토레지스트 개발에 관한 연구가 활발히 진행 중에 있다^[7].

포토레지스트의 주요 특성은 민감도(Sensitivity), 라인 에지 거칠기(Line Edge Roughness, LER), 해상도(Resolution) 등이 있다. 민감도는 포토레지스트가 빛에 대해 얼마나 민감한지를 의미하고 패턴을 만들 때 필요한 에너지의 척도이며 광원의 세기가 낮은 경우에는 민감도가 큰 포토레지스트가 필요하다. 라인 에지 거칠기는 패턴의 가장자리가 얼마나 거친지를 의미하며, 광자의 개수가 적을수록 거칠기가 증가한다^[6]. 해상도는 포토레지스트에 의해 형성될 수 있는 미세 패턴의 최소 크기를 나타낸다. 이러한 포토레지스트의 주요 특성들은 RLS(Resolution, Line Edge Roughness, Sensitivity) 상충관계(Trade-off)를 가지는 것으로 알려져 있다. 즉, 두 개의 특성이 향상되면 나머지 하나의 특성이 저하된다. 현재 RLS 상충관계를 극복하고자 다양한 재료 및 공정 등이 활발히 제안되어 연구 진행 중이다^[7].

제2절 포토레지스트의 종류

1. Novolak/DNQ 포토레지스트^[12]

Novolak/DNQ 포토레지스트의 경우, 미세 패턴을 형성하는 Novolak 레진, 빛에 반응하며 농도가 변하는 용해 억제제인 DNQ와 용매로 구성되어 있다. DNQ는 광활성 화합물(Photo Active Compound, PAC)로 불리운다. Novolak 레진 자체는 약 10 nm/sec의 용해속도를 가지고 있다. Novolak 레진과 DNQ를 혼합한 경우, 잘 용해되지 않는 불용성 물질이 되어 용해 속도가 Novolak 레진을 단독으로 사용하였을 때보다 낮아지게 된다. Novolak 레진과 DNQ를 혼합한 불용성 물질에 노광 공정을 진행한 경우, 광화학반응에 의해 DNQ의 보호기 탈리가 일어나 용해 속도가 증가하게 된다. 이러한 용해 속도의 증가는 노광 공정 중에 발생하는 화학적 반응 및 생성물의 영향으로 인한 결과이다. 노광 시, 빛을 받는 영역에서는 PAC의 보호기가 분리된다. 이로 인해 감광제인 PAC는 카복실산(Carboxylic Acid)으로 변환되어 염기성 환경에서 잘 용해되는 성질을 가지게 된다. 따라서 현상 공정 중 카복실산은 염기성 현상액과 상호작용하여 포토레지스트의 용해성을 증가시키므로 포토레지스트는 염기성 현상액에 잘 용해된다. 반면에 빛을 받지 않는 영역은 PAC와 레진 혼합성분이 현상액에 용해되지 않는 불용성 물질로 남아있게 된다.

2. 화학증폭형 포토레지스트(CAR)^[6,13,14]

DUV 파장인 KrF 노광 기술 이후부터는 파장이 짧아지면서 빛의 세기가 줄어들어 작은 세기에서도 패턴을 정상적으로 형성하기 위해 기존의 Novolak/DNQ 포토레지스트가 사용되지 않고 CAR이 개발되었다. CAR은 패턴을 형성하는 폴리머, 빛에 반응하는 광산발생제(Photo Acid Generator, PAG)와 용매로 구성되어 있다. CAR은 노광 공정 중에 PAG가 화학 반응을 하여 산(H⁺)을 생성하고, 노광 후 굽기(Post Exposure Bake, PEB) 공정 중에 산은 CAR 내의 폴리머와 반응하여 화학 반응을 유도하고 용해성 물질이 된다. 이러한 과정에서 산은 사라지지 않고 촉매작용을 통해 다른 여러 개의 폴리머와 연속적으로 상호작용을 하기에, 이를 화학증폭형이라고 부른다. 이러한 CAR은 적은 노광시간에도 높은 대비도(Contrast) 성능을 나타낸다.

가. KrF 포토레지스트

반도체 칩을 생산하는데 사용되는 광원의 파장과 광자의 에너지의 관계를 식 (1)에 표현하였다.

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

E , h , c , λ 는 각각 광자의 에너지, 플랑크 상수($6.62607015 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \cdot \text{kg/s}$), 빛의 속도, 파장을 의미한다. 식 (1)에서 알 수 있듯이 빛의 파장이 짧을수록 광자의 에너지가 커진다.

KrF는 248 nm의 파장을 가지며 Novolak/DNQ 포토레지스트를 쓰는 광원들보다 광자의 에너지가 크기 때문에 이에 최적화된 포토레지스트를 사용해야 한다. KrF에 최적화되어 개발된 포토레지스트용 폴리머는 폴리히드록시스티렌(Polyhydroxystyrene, PHOST)이다. KrF 포토레지스트는 PHOST의 수산기(-OH, Hydroxy Group) 수를 조절하는 것이 주요 특징이다. 노광 전에는 PHOST에서 수산기를 가려냈다가 노광 후에 수산기 그룹이 보이게 하는 기술이 사용된다. 이러한 KrF 포토레지스트는 높은 해상도와 패턴 정확도를 제공하여 Novolak/DNQ 포토레지스트를 사용하는 경우보다 섬세한 미세 패턴을 형성할 수 있다.

나. ArF 포토레지스트^[14]

ArF 포토리소그래피는 노광 공정에서 193 nm 파장을 사용하는 기술이다. ArF 포토레지스트는 100 ~ 60 nm의 미세 패턴 형성이 가능한 건식 ArF 포토레지스트(Dry ArF Photoresist)와 50 ~ 30 nm의 미세 패턴을 형성할 수 있는 액침 ArF 포토레지스트(Immersion ArF Photoresist)로 분류할 수 있다. 이러한 193 nm ArF 포토레지스트는 아크릴 계열의 폴리아크릴레이트(Polyacrylate) 폴리머가 사용되고 높은 화학적 안정성과 성능 향상을 제공한다.

ArF 포토레지스트는 아크릴레이트(Acrylate) 폴리머, PAG, 활성감소제(Quencher), 용매로 구성되어 있으며 활성감소제는 노광되지 않은 부분에 산이 확산되는 것을 억제하는 역할을 한다.

다. 극자외선(EUV) 포토레지스트^[7]

극자외선 공정은 13.5 nm의 파장을 사용하여 반도체 칩을 노광하는 공정이다. 이 광원은 자연계에 존재하지 않아 인위적으로 만들어야 하기 때문에 광원을 얻기 위해서는 여러 어려움이 따른다. 극자외선을 생성하는데 사용되는 광원은 전극 사이에 전류를 가하여 발생하는 빛을 수집기(Collector)로 반사시켜 모아주는 방식인 방전 유도 플라즈마(Discharge Produced Plasma, DPP)와 CO₂ 레이저를 주석 방울(Tin Droplet)에 맞춰 발생한 빛을 수집기로 반사시키는 레이저 유도 플라즈마(Laser Produced Plasma, LPP)를 사용할 수 있다^[1]. 극자외선 광원은 ArF 광원에 비해 파장이 1/14만큼 짧고 에너지는 14배 크다. ArF 포토레지스트와 극자외선 포토레지스트의 민감도가 비슷하다면 극자외선의 경우 노광에 필요한 광자의 수가 1/14로 줄어들게 됨을 예측할 수 있다. 광자 수가 적을 경우, 웨이퍼 위에는 거친 회로 패턴이 형성된다. 현재 EUV의 포토레지스트는 라인 에지 거칠기 특성이 좋지 않으며 이를 확률론적 효과(Stochastic Effect)라 한다^[6]. 이 문제는 미세한 패턴에서 더 큰 이슈로 부각되고 있다. 앞서 설명한 바와 같이 라인 에지 거칠기 특성을 향상시키면서도 RLS 상충관계를 극복하고자 하는 다양한 연구가 진행되고 있다^[7].

제3장 이론적 배경

포토리소그래피 공정의 노광, 현상 공정은 반도체 제조에서 미세 패턴을 형성하기 위한 중요 단계이다. 이러한 공정을 통해 일어나는 포토레지스트의 화학적 변화는 패턴이 형성될 때 품질과 해상도에 중대한 영향을 미친다. 노광 공정과 관련된 Dill 모델^[8-10]과 현상 공정과 관련된 Mack 모델^[11]을 사용하여 포토레지스트의 특성을 측정할 수 있다. 본 연구에서는 Dill 모델과 Mack 모델을 사용하여 포토레지스트의 특성 파라미터를 측정한 후 현상 공정에 의해 형성된 포토레지스트의 형상은 광선추적법을 통해 계산하였다.

제1절 노광 공정에 대한 Dill 모델^[15]

포토레지스트의 노광 공정을 기술하는 Dill 모델 방정식은 아래의 식으로 표현된다^[9,16].

$$\frac{\partial I(z,t)}{\partial z} = -I(z,t)[Am(z,t)+B] \quad (2)$$

$$\frac{\partial m(z,t)}{\partial t} = -I(z,t)m(z,t)C \quad (3)$$

I 는 노광 공정에서의 광의 세기(Irradiance), m 은 PAC의 상대 농도를 뜻한다. 변수 z 와 t 는 포토레지스트 표면으로부터 용해 깊이(Dissolution Depth)와 노광하는 시간(Exposure Time)을 의미한다. A 와 B 는 PAC 농도에 의존하는 흡수계수(Bleachable Absorption Coefficient)와 의존하지 않는 흡수계수(Nonbleachable Absorption Coefficient)를 나타낸다. PAC의 광화학반응 속도에 기여하는 C 는 노광률 상수(Exposure Rate Constant)라 한다. 식 (3)은 시간이 증가함에 따라 PAC의 상대 농도가 감소함을 보여주고 있으며, 흡수계수 $\alpha = Am(z,t)+B$ 또한 함께 감소함을 알 수 있다. 이러한 현상을 블리칭(Bleaching)이라 한다. 노광을 하기 전 화학반응이 일어나지 않아 PAC의 농도가 최대($m=1$)인 경우, 흡수계수는 최대값인 $A+B$ 가 되고 노광을 충분히 하여 PAC가 완전히 변환된 경우($m=0$)의 흡수계수는 최소값인 B 가 된다.

식 (2)와 (3)으로 표현되는 Dill 모델 방정식의 완전해를 아래의 식과 같이 유도할 수 있다^[17].

$$\int_{g(t)}^{m(z,t)} \frac{dx}{x[A(1-x) - B \ln x]} = z \quad (4)$$

$$I = I_0 \frac{[A(1-m) - B \ln m]}{\{A[1 - \exp(-I_0 Ct)] + BCI_0 t\}} \quad (5)$$

식 (4)와 (5)에서 $g(t)$ 는 포토레지스트 표면($z=0$)에서 PAC의 상대 농도 $m(0,t) = \exp(-I_0 Ct)$ 를 나타내고 I_0 는 포토레지스트 표면에서 노광 공정에 기여하는 광의 세기이다. 포토레지스트에 가해지는 노광량(Exposure Dose)은 $I_0 t / \tau_{12}$ 로 표현할 수 있는데 파라미터 τ_{12} 는 포토레지스트와 공기 경계에서의 투과율로 포토레지스트의 굴절률을 n_{Resist} 라고 할 때 다음과 같이 주어진다.

$$\tau_{12} = 1 - \left(\frac{n_{\text{Resist}} - 1}{n_{\text{Resist}} + 1} \right)^2 \quad (6)$$

본 논문에서는 노광 공정을 통해 얻게 된 실험 결과를 분석하기 위해 편미분방정식인 식 (2)와 (3)을 계산하는 것이 아닌 접근하기 쉬운 방법인 식 (4)와 (5)를 사용하였다.

제2절 현상 공정에 대한 Mack 모델^[11,18]

포토레지스트의 현상 공정에서 용해 속도 R 과 PAC 농도 m 의 관계를 표현하는 Mack 모델 방정식은 아래의 식으로 정리된다^[11,18].

$$R = R_{\max} \frac{(a+1)(1-m)^n}{a + (1-m)^n} + R_{\min} \quad (7)$$

$$a = \frac{(n+1)}{(n-1)} (1 - m_{th})^n \quad (8)$$

R_{\max} 는 최대 용해 속도, R_{\min} 은 최소 용해 속도를 의미하고 n 은 용해 선택도 파라미터(Dissolution Selectivity Parameter), m_{th} 은 문턱 억제제 농도(Threshold Inhibitor Concentration)라 한다. 파라미터 a 가 1보다 매우 큰 경우 식 (7)은 다음과 같이 간략화된다.

$$R = R_{\max}(1 - m)^n + R_{\min} \quad (9)$$

식 (7) 또는 (9)를 사용하여 포토레지스트의 용해 속도에 대한 모델링이 가능하다. 노광을 하기 전 PAC의 농도는 최대($m = 1$)이기 때문에 용해 속도는 R_{\min} 이 되고, 충분히 노광을 한 경우 PAC의 농도가 최소($m = 0$)가 되므로 용해 속도 R 은 $R_{\max} + R_{\min}$ 이 된다.

제3절 포토레지스트 형상 시뮬레이션을 위한 광선추적법

호이겐스의 원리는 빛의 파면이 전파하는 원리를 설명한다^[19]. 임의의 파면이 주어졌을 때 그 파면의 모든 지점은 점광원으로 작용하고 각 점광원으로부터 발생한 구면파들이 중첩되어 형성하는 포락선이 전파된 다음 파면을 형성한다. 현상 공정에서 포토레지스트의 표면이 용해되는 과정 또한 이와 유사하다. 이는 현상 공정이 등방성의 특성을 가지기 때문이다^[19,20].

파면의 전파를 기술하는 아이코날 방정식(Eikonal Equation)은 다음과 같다^[21].

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2 = \frac{1}{v(x, y, z)^2} \quad (10)$$

식 (10)에서 T 는 파면이 도착하는 시간을 의미하고, v 는 파면의 진행 속도를 나타낸다.

빛의 전파는 파면뿐만 아니라 이와 수직인 광선의 경로를 추적하여 기술할 수도 있다. 광선의 진행 경로를 기술하는 광선방정식은 다음과 같이 주어진다^[22].

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{d\mathbf{r}}{ds} \right) = \nabla n \quad (11)$$

식 (11)에서 n 은 굴절률, s 는 광선 궤적의 길이를 의미하며 \mathbf{r} 은 $x(s), y(s), z(s)$ 를 성분으로 갖는 광선의 공간 좌표이다.

근축 근사(Paraxial Approximation) 영역에서 n 이 x 와 z 만의 함수라면 식 (11)은 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dz} \left(n \frac{dx}{dz} \right) = \frac{\partial n}{\partial x} \quad (12)$$

식 (12)는 곱셈의 미분법칙에 의해 식 (13)으로 변환된다.

$$\frac{d^2 x}{dz^2} = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x} - \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial z} \frac{dx}{dz} \quad (13)$$

식 (13)의 2차 미분방정식은 다음과 같이 1차 미분방정식 2개로 분리하여 표현할 수 있다^[23].

$$\frac{dx(z)}{dz} = x'(z) = u(z) \quad (14)$$

$$\frac{du}{dz} = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x} - \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial z} u(z) \quad (15)$$

본 논문에서는 4차 룽게-쿠타 방법(Runge-Kutta Method)^[24]을 적용하여 식 (14)와 (15)를 수치해석적으로 풀었다.

제4절 레이저 직접 묘화 시스템의 에어리얼 이미지

본 연구에서 노광 공정을 하기 위해 사용한 장비는 Maskless Lithography Tool(MLT)이라고 명명된 레이저 직접 묘화 시스템이다^[25-27]. 최대 10 비트의 그레이 스케일 변조가 가능하고 노광량을 조절할 수 있는 음향 광학 변조기(Acousto-Optic Modulator, AOM)가 활용되며 2 W 연속발진 Ar-ion 레이저(Innova Sabre Series, Coherent)를 광원으로 사용한다. MLT의 레이저 빔 경로에는 363 nm 파장에 대한 대역 필터가 삽입되어 있다. MLT는 래스터 주사(Raster

Scan) 방식으로 노광을 진행한다. 고속(3000 rpm)으로 회전하는 12면으로 구성된 다면경을 사용하여 한쪽 축 방향으로 고속 주사(Fast-Scan)를 구현하며, 선형 스테이지(ALS130 Series, Aero Tech Corp.)를 사용하여 고속 주사와 수직축 방향으로 저속 주사(Slow-Scan)를 구현한다. MLT 시스템은 2.1 μm 의 레스터 주사 픽셀 크기를 채택하고 있다.

고속 및 저속 주사 축을 각각 x 축 및 y 축으로 가정하였을 때 가우시안 형태의 레이저 빔 스폿에 의해 형성되는 에어리얼 이미지(Aerial Image)는 다음의 식과 같다^[25].

$$I_x(x) = \left[Q_x(x) \text{comb}\left(\frac{x}{p}\right) \right] \otimes \frac{1}{p} \text{rect}\left(\frac{x}{p}\right) \otimes \frac{1}{\omega} \text{Gaus}\left(\frac{x}{\omega}\right) \quad (16)$$

$$I_y(y) = \left[Q_y(y) \text{comb}\left(\frac{y}{p}\right) \right] \otimes \frac{1}{\omega} \text{Gaus}\left(\frac{y}{\omega}\right) \quad (17)$$

위 식에서 p 와 ω 는 각각 픽셀의 크기와 가우시안 빔의 반경을 의미한다. 고속 주사 방향인 x 축에서는 연속적인 주사가 발생하므로 rect 함수와의 합성곱(Convolution)이 적용되지만 저속 주사 방향인 y 축에서는 선형 스테이지를 사용하여 한 픽셀씩만 이동하므로 rect 함수와의 합성곱을 적용할 필요가 없다. 표적 이미지는 픽셀 크기 간격으로 샘플링되고 샘플링된 위치에서 그레이 스케일 변조 비트 수(N)에 의해 그레이 스케일 값은 2^N 개의 레벨로 이미지의 양자화(Quantization)를 진행한다. $Q_x(x)$ 와 $Q_y(y)$ 는 각각 x 축과 y 축 방향으로 양자화된 이미지를 의미한다. 식 (16)과 식 (17)에서 사용되는 comb 함수, rect 함수, Gaus 함수는 다음의 식으로 표현된다^[28].

$$\text{comb}(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x-n) \quad (18)$$

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1, & |x| < \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2}, & |x| = \frac{1}{2} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

$$\text{Gaus}(x) = \exp(-\pi x^2) \quad (20)$$

가우시안 빔의 반경 ω 는 가우시안 빔의 반값 너비(Full Width at Half Maximum, FWHM) ω_0 와 다음과 같은 관계식을 만족한다.

$$\omega_0 = 2\sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \omega \quad (21)$$

식 (16)에서 rect 함수와 Gaus 함수의 합성곱 부분은 x 축 방향의 픽셀 이미지를 의미하고 식 (22)와 같이 간략히 표현할 수 있다^[29].

$$\begin{aligned} I_{\text{pixel},x}(x) &= \frac{1}{p} \text{rect}\left(\frac{x}{p}\right) \otimes \frac{1}{\omega} \text{Gaus}\left(\frac{x}{\omega}\right) \\ &= \frac{1}{2p} \left\{ \text{erf}\left[\frac{\sqrt{\pi}}{\omega}\left(x + \frac{p}{2}\right)\right] - \text{erf}\left[\frac{\sqrt{\pi}}{\omega}\left(x - \frac{p}{2}\right)\right] \right\} \end{aligned} \quad (22)$$

위 식에서 erf 함수는 다음과 같이 정의된 오차 함수를 의미한다^[30].

$$\text{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt \quad (23)$$

전체 픽셀 이미지는 y 축 방향의 가우시안 스폿 함수까지 고려하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I_{\text{pixel}}(x,y) = \frac{1}{2p\omega} \left\{ \text{erf}\left[\frac{\sqrt{\pi}}{\omega}\left(x + \frac{p}{2}\right)\right] - \text{erf}\left[\frac{\sqrt{\pi}}{\omega}\left(x - \frac{p}{2}\right)\right] \right\} \text{Gaus}\left(\frac{y}{\omega}\right) \quad (24)$$

위의 내용들을 종합하여 에어리얼 이미지에 대한 최종적인 수학적 표현식을 정리하면 다음과 같다.

$$I(x,y) = \left[Q(x,y) \text{comb}\left(\frac{x}{p}\right) \text{comb}\left(\frac{y}{p}\right) \right] \otimes I_{\text{pixel}}(x,y) \quad (25)$$

식 (25)는 임의의 픽셀 이미지에 대해서도 적용가능한 가장 일반적인 식이다.

제4장 결과 및 논의

제1절 포토레지스트 샘플 준비

본 연구에서는 슬라이드 유리 기판에 포토레지스트를 코팅하여 특성 측정 및 현상 공정 후 포토레지스트의 형상 측정에 관한 연구를 수행하였다. 슬라이드 유리 기판의 준비 과정은 다음과 같다. 기판을 아세톤, 메탄올, 그리고 탈이온수(Deionized Water)에 차례로 각각 30분씩 담근 후, 120 °C에서 1시간 동안 오븐 굽기(Oven Bake)를 진행하였다. 본 연구에서 사용한 포토레지스트는 Fujifilm사(Fujifilm Electronic Materials U.S.A., Inc., RI, USA)의 양성 포토레지스트인 AP2205B이다. 앞서 준비한 기판 위에 포토레지스트 막을 형성하기 위해 총 3단계(1단계: 1,000 rpm/10 s, 2단계: 3,000 rpm/30 s, 3단계: 1,000 rpm/10 s)에 걸친 스핀 코팅 공정을 진행하였다. 코팅 후 용매를 제거하기 위해 115 °C에서 3분간 코팅 후 굽기(Soft Bake)를 진행하였다. 이렇게 형성된 포토레지스트 박막의 두께는 약 6 μm이었다.

Fujifilm사에서는 아래와 같은 코시 방정식(Cauchy Equation)을 사용하여 포토레지스트의 굴절률에 대한 정보를 제공하고 있다^[31].

$$n(\lambda) = a + \frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4} \quad (26)$$

본 연구에서 사용한 AP2205B에 대한 코시 계수(Cauchy Coefficient) a, b, c 는 각각 1.76, 7999.7, 15058.3이다^[32]. 따라서 MLT의 노광 파장인 363 nm에서의 굴절률은 1.8207임을 알 수 있다.

현상 공정에는 탈이온수와 Fujifilm사의 현상액(OPD4262)을 3:1로 혼합된 용액을 사용하였다. 이 때, 현상 용액의 온도는 78.0 ± 1.0 °F로 유지하였다.

제2절 포토레지스트의 특성 측정

1. Dill 모델 파라미터 측정

Dill 모델 파라미터 중 A 와 B 는 흡수계수를 이용하여 구할 수 있다. 앞에서 언급하였듯이 노광을 하지 않은 경우($m=1$)의 흡수계수 $\alpha_{\text{Unexposed}}$ 는 $A+B$ 이고 충분히 노광을 한 경우($m=0$)의 흡수계수 $\alpha_{\text{Fully-Exposed}}$ 는 B 로 표현된다. 노광하지 않은 포토레지스트 샘플과 충분히 노광한 포토레지스트 샘플을 각각 준비하고 흡수계수를 측정하기 위해 분광광도계(Varian Cary 5000; Agilent, CA, USA)를 사용하였다. 충분히 노광하여 포토레지스트의 PAC가 모두 사라지게 하기 위해 자외선 할로겐 램프를 사용하였다.

그림 1은 흡수 계수를 측정한 결과이다. 파장이 363 nm일 때 노광을 하지 않은 경우와 충분히 노광을 한 경우의 흡수계수는 각각 $\alpha_{\text{Unexposed}} = 0.6996 \mu\text{m}^{-1}$, $\alpha_{\text{Fully-Exposed}} = 0.1748 \mu\text{m}^{-1}$ 이었다. 이 결과를 사용하여 Dill 모델 파라미터 $A(\alpha_{\text{Unexposed}} - \alpha_{\text{Fully-Exposed}})$ 와 $B(\alpha_{\text{Fully-Exposed}})$ 는 각각 $0.5248 \mu\text{m}^{-1}$, $0.1748 \mu\text{m}^{-1}$ 로 결정되었다.

Dill 모델의 C 파라미터를 결정하기 위해 노광하지 않은 샘플과 충분히 노광한 샘플 이외에 노광량이 다른 5개의 포토레지스트 샘플을 추가로 준비하고 분광광도계를 사용하여 각각의 투과율을 측정하였다. 표 1은 측정된 투과율 결과를 보여주고 있다. 노광량이 증가할수록 포토레지스트 샘플의 투과율도 증가함을 확인할 수 있다. C 파라미터를 변화시키면서 이론적인 투과율을 구하고 측정된 투과율과의 오차를 비교하였다. 이론적인 투과율과 측정된 투과율 간의 오차는 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error, RMSE) 함수를 사용하였고 다음과 같이 표현된다.

$$\text{RMSE}_1 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{ci} - T_{mi})^2} \quad (27)$$

위 식에서 T_{ci} 와 T_{mi} 는 각각 이론적인 투과율과 측정된 투과율을 의미하고 N 은 샘플의 개수를 나타낸다.

그림 2(a)는 C 파라미터를 변화시켜가며 얻은 평균 제곱근 오차 RMSE_1 을 보여주고 있다. 최소 평균 제곱근 오차 RMSE_1 값을 얻을 수 있는 6.209×10^{-3}

cm^2/mJ 을 C 파라미터 값으로 결정하였다. 이 때 최소 오차는 0.0019이었다. 그림 2(b)는 결정된 C 파라미터를 사용하여 구한 이론적인 투과율과 측정된 투과율을 비교한 것이다. 두 결과가 매우 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

2. Mack 모델 파라미터 측정

노광을 하지 않은 샘플과 충분히 노광한 샘플을 각각 3개씩 준비하고 현상 시간을 달리하여 두께 변화를 측정하였다. 포토레지스트의 두께를 측정할 때 사용된 장비는 표면 단차 측정기(Wyko NT9800; Veeco, NY, USA)이다. 그림 3(a)와 (b)는 각각 노광을 하지 않은 샘플과 충분히 노광한 샘플에 대한 측정 결과를 보여주고 있다. 노광을 하지 않은 경우와 충분히 노광한 경우의 용해 속도는 각각 $R_{\text{Unexposed}} = 0.0052 \mu\text{m}/\text{s}$ 와 $R_{\text{Fully-Exposed}} = 0.0579 \mu\text{m}/\text{s}$ 임을 알 수 있다. 이 결과를 통해 Mack 모델의 파라미터인 R_{min} , R_{max} 는 각각 $R_{\text{min}} = R_{\text{Unexposed}} = 0.0052 \mu\text{m}/\text{s}$, $R_{\text{max}} = R_{\text{Fully-Exposed}} - R_{\text{Unexposed}} = 0.0527 \mu\text{m}/\text{s}$ 로 결정된다.

나머지 Mack 모델 파라미터를 결정하기 위해 노광량을 위치별로 변화시킨 ($0 \text{ mJ}/\text{cm}^2 \sim 120 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 까지 $5 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 간격, 총 25개의 값) 포토레지스트 샘플을 준비하였다. 먼저 간략화된 Mack 모델 방정식인 식 (9)를 사용하여 n 파라미터를 결정하였다. 본 논문에서는 이를 모델 I이라 부르도록 하겠다. 이 경우에도 Mack 모델 n 파라미터의 값을 변화시키면서 이론적인 포토레지스트의 두께를 계산하고 측정값과의 오차가 가장 작은 n 파라미터를 결정하였다. 이 때 사용한 평균 제곱근 오차는 다음과 같다.

$$\text{RMSE}_2 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_{ci} - d_{mi})^2} \quad (28)$$

위 식에서 d_{ci} 와 d_{mi} 는 각각 이론적으로 계산한 두께와 측정된 두께이다. N 은 노광량의 개수인 25이다. 이론적 두께를 구하기 위해 아래의 식을 사용하였다.

$$t = \int_0^z \frac{1}{R(z')} dz' \quad (29)$$

용해 속도 R 은 포토레지스트 표면으로부터 용해된 깊이 z 와 현상 시간 t 에 대한 변화율($R = dz/dt$)로 정의할 수 있기 때문에 z 와 t 의 관계는 식 (29)를 만족한다.

그림 4(a)는 n 파라미터를 변화시켜가며 얻은 평균 제곱근 오차 $RMSE_2$ 를 보여주고 있다. 최소 평균 제곱근 오차 $RMSE_2$ 값을 얻을 수 있는 1.217을 n 파라미터의 값으로 결정하였다. 이 때 최소 오차는 $0.0494 \mu m$ 이었다. 그림 4(b)는 결정된 n 파라미터를 사용하여 구한 이론적인 포토레지스트의 두께와 측정된 두께를 비교한 것이다. 두 결과가 비교적 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

추가적으로 본래의 Mack 모델 방정식인 식 (7)을 사용하여 a 와 n 파라미터를 결정하였다. 본 논문에서는 이를 모델 II라 부르도록 하겠다. 이 경우에도 Mack 모델 파라미터인 a 와 n 값을 변화시키면서 이론적인 포토레지스트의 두께를 계산하고 측정값과의 오차가 가장 작은 a 와 n 파라미터를 결정하였다.

그림 5(a)는 a 와 n 파라미터를 변화시켜가며 얻은 평균 제곱근 오차 $RMSE_3$ 를 보여주고 있다. $RMSE_3$ 는 식 (28)과 동일한 형태로 정의하였으며 이론적인 두께값을 계산할 때 a 와 n 파라미터를 모두 사용하였다. 최소 평균 제곱근 오차 $RMSE_3$ 값을 얻을 수 있는 3.10과 1.380을 각각 a 와 n 파라미터의 값으로 결정하였다. 이 때 최소 오차는 $0.0470 \mu m$ 이었다. 그림 5(b)는 결정된 a 와 n 파라미터를 사용하여 구한 이론적인 포토레지스트의 두께와 측정된 두께를 비교한 것이다. 두 결과가 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

모델 II를 사용한 경우 모델 I에 비해 평균 제곱근 오차가 더 작았다. 이를 통해 n 파라미터만 사용하는 간략화된 경우보다 a 와 n 파라미터 모두를 사용할 때 측정값과 좀 더 부합한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 본 논문에서 결정한 포토레지스트(AP2205B)의 Dill 및 Mack 모델 파라미터를 표 2에 정리하였다.

표 1 노광량에 따른 포토레지스트 샘플의 투과율 측정 결과

Exposure Dose [mJ/cm ²]	Measured Transmittance
Unexposed	0.0152
81	0.0235
162	0.0312
243	0.0419
324	0.0579
405	0.0689
Fully Exposed	0.3532

표 2 본 논문에서 결정한 포토레지스트(AP2205B)의 Dill 및 Mack 모델
파라미터

Dill's Parameters	A	0.5248 [μm^{-1}]
	B	0.1748 [μm^{-1}]
	C	6.209×10^{-3} [cm^2/mJ]
Mack's Parameters	R_{\min}	0.0052 [$\mu\text{m}/\text{s}$]
	R_{\max}	0.0527 [$\mu\text{m}/\text{s}$]
	(Model I)	$n = 1.217$
	(Model II)	$a = 3.100$
		$n = 1.380$

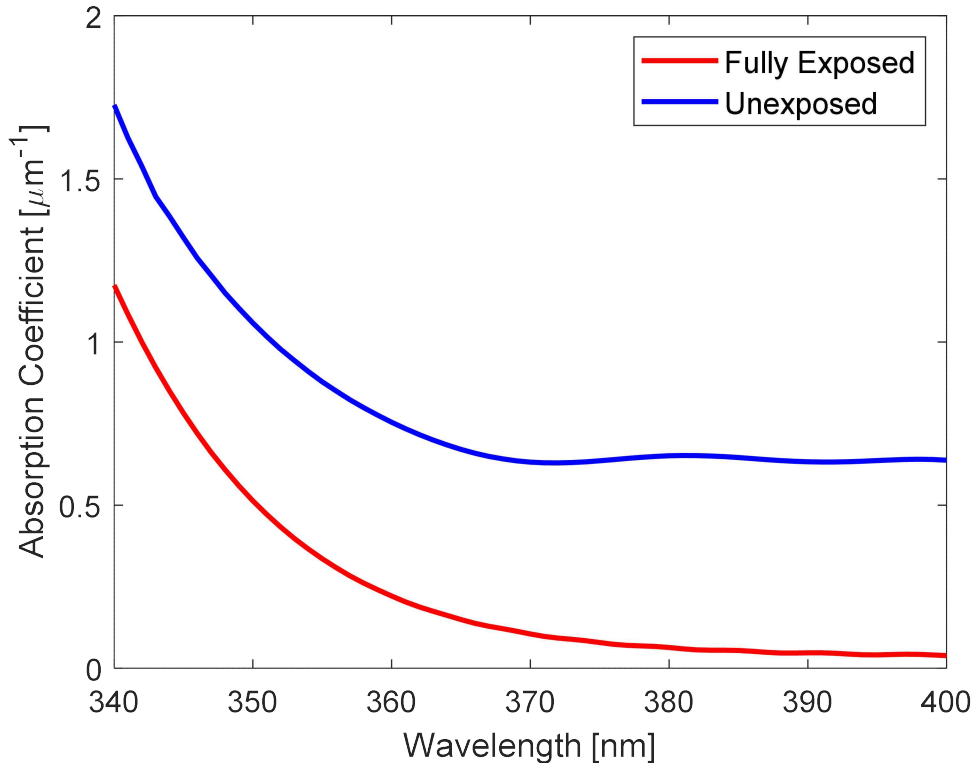
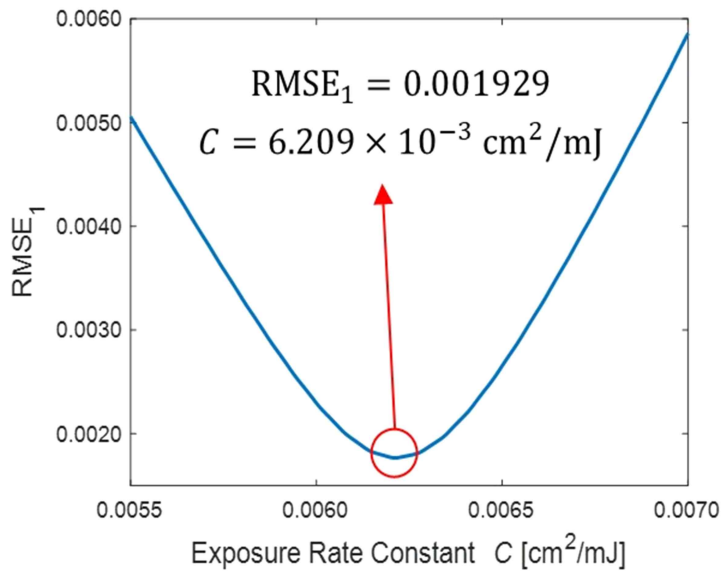
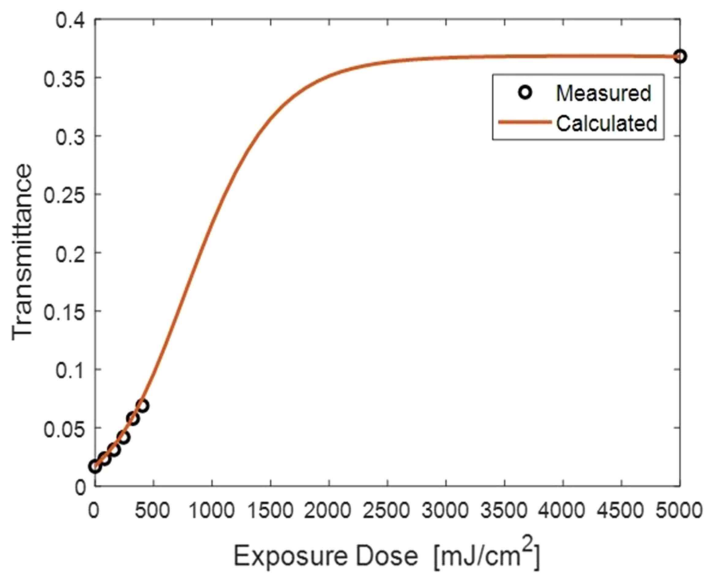


그림 1 흡수계수 측정 결과



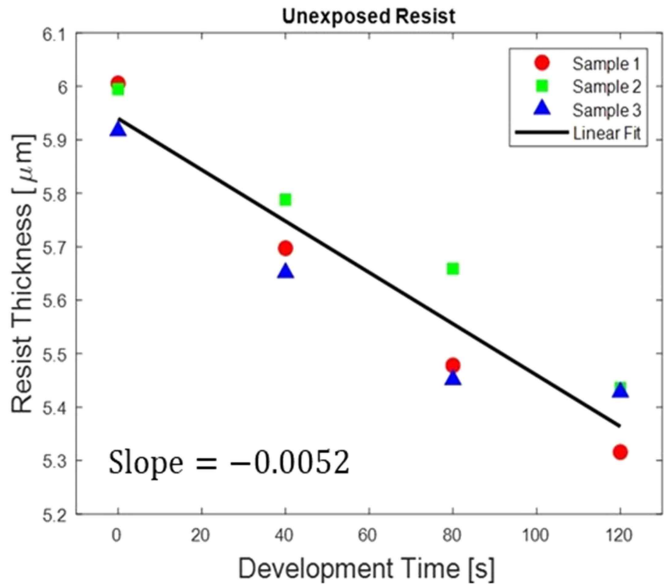
(a)



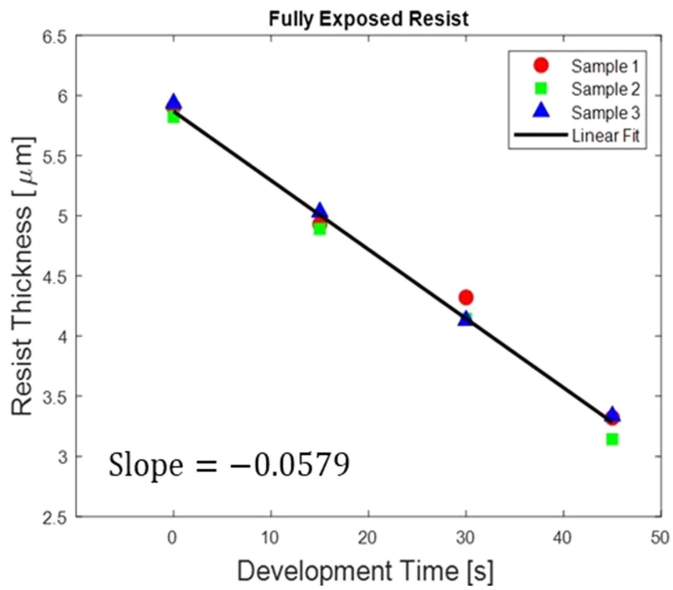
(b)

그림 2 (a) 노광률 상수 C 의 변화에 따른 평균 제곱근 오차, (b) 측정 및 계산된 투과율 비교(평균 제곱근 오차가 최소인 경우:

$$C = 6.209 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{mJ})$$



(a)



(b)

그림 3 (a) 노광을 하지 않은 샘플과 (b) 충분히 노광한 샘플의 현상 시간에 따른 포토레지스트 잔여 두께

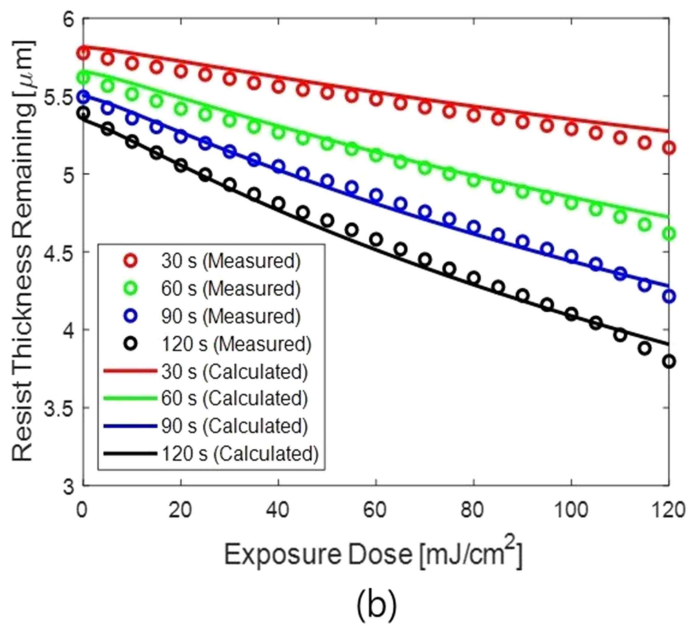
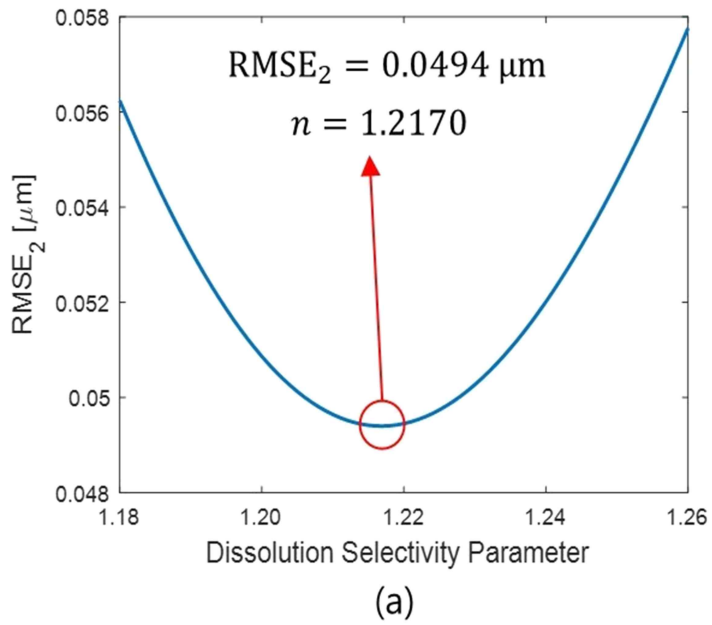
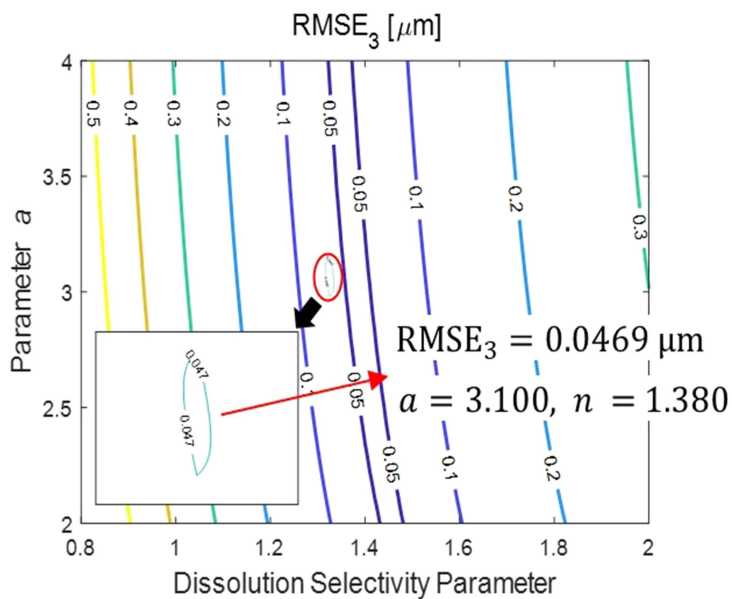
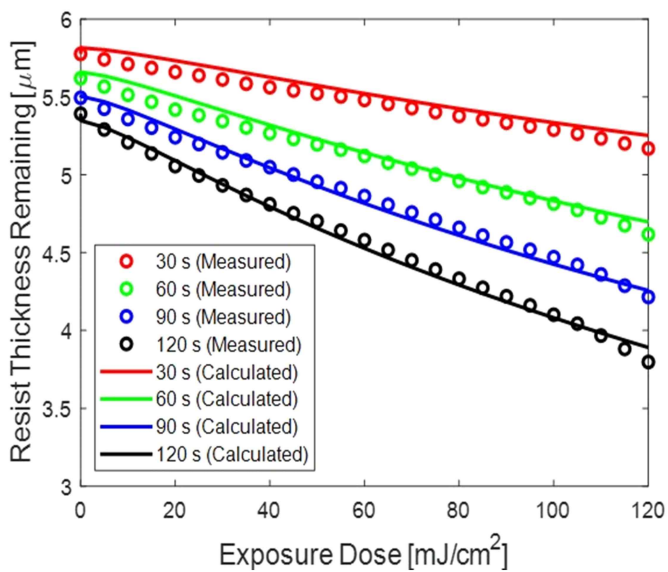


그림 4 (a) 용해 선택도 파라미터 n 의 변화에 따른 평균 제곱근 오차,
 (b) 측정 및 계산된 포토레지스트 두께 비교(평균 제곱근 오차가
 최소인 경우: $n = 1.2170$)



(a)



(b)

그림 5 (a) 파라미터 a 와 용해 선택도 파라미터 n 의 변화에 따른 평균 제곱근 오차, (b) 측정 및 계산된 포토레지스트 두께 비교(평균 제곱근 오차가 최소인 경우: $a = 3.10$, $n = 1.380$)

제3절 포토레지스트 형상 시뮬레이션

1. 예비 시뮬레이션

그림 6은 현상 공정 후의 포토레지스트 형상 시뮬레이션 과정을 보여주고 있다. 먼저 원하는 포토레지스트의 형태인 패턴 데이터를 설정한 후 픽셀별 노광 데이터를 구한다. 노광 데이터와 픽셀 이미지 간의 합성곱인 에어리얼 이미지를 계산하고 Dill 모델을 사용하여 용해 속도 분포를 구한다. Mack 모델과 광선추적법을 사용하여 현상 시간별 포토레지스트의 두께 분포에 관한 시뮬레이션을 수행하고 현상 후의 최종 포토레지스트 형상을 구한다.

본 논문에서는 톱니(Sawtooth) 형태의 패턴에 대한 시뮬레이션과 실험적 연구를 진행하였다. 톱니 패턴 함수 ST는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$ST(x) = \begin{cases} -\frac{1}{\lambda}x + 1 & 0 \leq x < \lambda \\ ST(x + m\lambda) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (30)$$

위의 식에서 λ 는 톱니 패턴의 주기, m 은 정수를 의미한다.

그림 7은 톱니 패턴과 가우시안 픽셀 이미지의 합성곱을 사용하여 계산한 에어리얼 이미지를 보여주고 있다. 이 때, 톱니 패턴의 주기 $\lambda = 105 \mu\text{m}$ 이었고 가우시안 빔의 반값 너비 $\omega_0 = 2.5 \mu\text{m}$ 이었다. 톱니 패턴에 대한 노광 데이터를 구할 때 MLT 시스템에서 권장하는 8 비트 그레이 스케일 변조를 가정하였다.

일반적으로 광학 현상에서의 굴절률 n 은 c 를 진공에서의 빛의 속도, v 를 매질에서의 빛의 속도라 할 때 $n = c/v$ 로 정의된다. 이와 유사하게 현상 경로(Development Path)에 대한 굴절률 n_R 은 R_{max} 를 최대 용해 속도, R 을 임의의 지점에서의 용해 속도라 할 때 $n_R = R_{\text{max}}/R$ 로 정의할 수 있다^[33].

그림 8(a)는 그림 7에 제시된 에어리얼 이미지를 사용하여 계산한 포토레지스트의 용해 속도 R 의 분포를 보여주고 있다. 이 때, 포토레지스트의 특성 파라미터는 제4장 2절에서 구한 값들을 사용하였다. 그림 8(b)는 현상 경로에 대한 굴절률 n_R 의 분포를 나타낸다.

그림 9(a)는 그림 8(b)에 제시된 굴절률 n_R 의 분포를 사용하여 수행한 현상 광선 궤적에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 그림 9(b)는 현상 시간별(30s, 60s,

90s, 120s) 포토레지스트의 형상 시뮬레이션 결과이다. 일반적으로 현상 경로는 직선이 아니므로 식 (29)와 달리 현상 경로를 고려한 다음과 같은 식을 사용하여 현상 시간별 포토레지스트의 형상을 계산하였다.

$$t = \int_0^s \frac{1}{R(x', z')} ds' \quad (31)$$

2. 측정된 픽셀 이미지를 사용한 시뮬레이션

그림 10은 측정된 MLT 시스템의 픽셀 이미지의 예를 보여주고 있다. 그림 10(a)와 (b)는 각각 최상 초점(Best Focus)과 최상 초점에서 벗어난 불량 초점(Poor Focus) 조건일 때 측정된 결과이다. 측정된 2종의 픽셀 이미지를 사용하여 현상 후 포토레지스트 형상에 관한 시뮬레이션을 수행하였다.

예비 시뮬레이션과 동일하게 톱니 모양의 패턴 데이터를 사용하였고 총 6개의 톱니 패턴 주기에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 톱니 패턴의 주기는 각각 $210 \mu\text{m}$ (100 pixel), $168 \mu\text{m}$ (80 pixel), $126 \mu\text{m}$ (60 pixel), $84 \mu\text{m}$ (40 pixel), $42 \mu\text{m}$ (20 pixel), $21 \mu\text{m}$ (10 pixel)이었다.

그림 11(a)와 (b)는 각각 주기가 100 pixel인 톱니 패턴에 대한 패턴 데이터와 노광 데이터를 보여주고 있다. 그림 12는 그림 11(b)에 제시된 노광 데이터와 최상 초점 조건일 때의 픽셀 이미지를 사용하여 계산한 에어리얼 이미지이다. 그림 13(a)와 (b)는 각각 이 때 계산한 포토레지스트의 용해 속도 R 의 분포와 현상 경로에 대한 굴절률 n_R 의 분포를 나타낸다.

다른 주기의 톱니 패턴에 대해서도 동일한 과정을 거쳐 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 14는 최상 초점 조건 픽셀 이미지를 사용하였을 때 현상 시간별(30s, 60s, 90s, 120s) 포토레지스트의 형상 시뮬레이션 결과를 보여준다. 현상 시간 120s일 때의 톱니 패턴 주기별 포토레지스트 형상 시뮬레이션 결과를 그림 15에 정리하였다. 불량 초점 조건 픽셀 이미지를 사용하여 동일한 시뮬레이션을 추가로 수행하였다. 불량 초점 조건에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 16과 같다.

시뮬레이션 결과와 비교하기 위해 시뮬레이션에 사용한 주기와 동일한 값을 갖는 톱니 패턴을 제작하였고 현상 시간 120s일 때의 포토레지스트 형상을 측정하였다. 측정된 결과는 그림 17과 같다. 이 때 실험은 최상 초점 조건에서 실시하였

다. 시뮬레이션 결과인 그림 15의 포토레지스트 형상과 측정된 결과인 그림 17의 포토레지스트 형상이 모든 주기에 대해 매우 유사함을 알 수 있다. 이를 정량적으로 확인하기 위해 톱니 패턴의 주기에 따른 포토레지스트 형상의 높이 값들을 비교하였다.(그림 18 참조) 톱니 패턴의 주기가 짧아짐에 따라 포토레지스트 형상의 높이가 또한 작아지는 경향을 보였다. 최적 초점 조건보다 불량 초점 조건일 때 포토레지스트 형상의 높이가 작아지는 경향이 더 두드러졌다. 최적 초점 조건의 픽셀 이미지를 사용하여 시뮬레이션을 수행한 결과와 측정 결과가 매우 잘 일치하고 있음을 확인하였다.

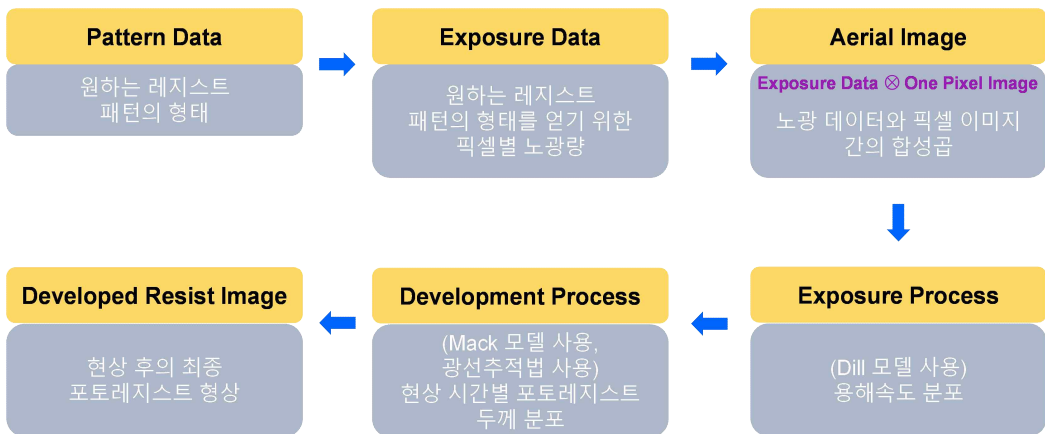


그림 6 현상 공정 후의 포토레지스트 형상 시뮬레이션 과정

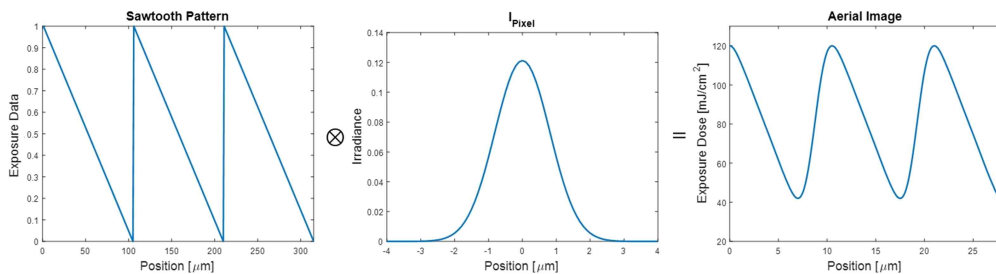


그림 7 톱니 패턴과 가우시안 픽셀 이미지의 합성곱을 사용하여 계산한 에어리 열 이미지($\lambda = 105 \mu\text{m}$, $\omega_0 = 2.5 \mu\text{m}$)

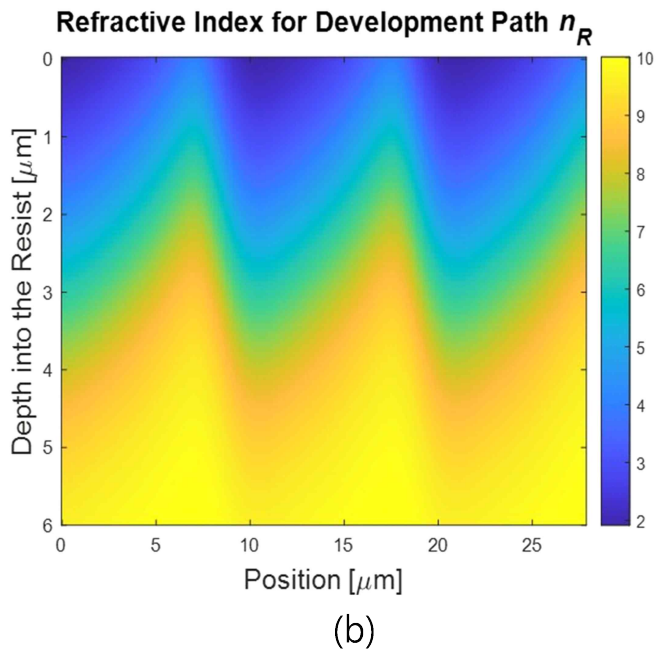
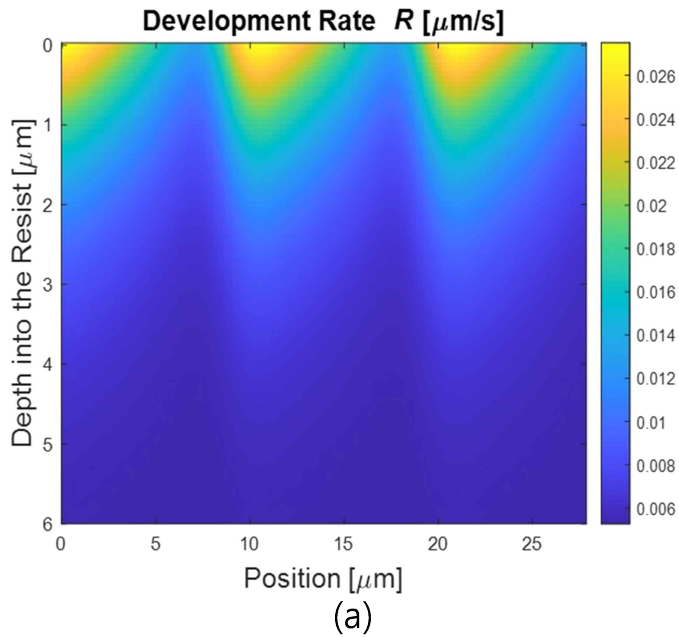


그림 8 예비 시뮬레이션에 사용된 (a) 포토레지스트의 용해 속도 R 의 분포,
 (b) 현상 경로에 대한 굴절률 n_R 의 분포

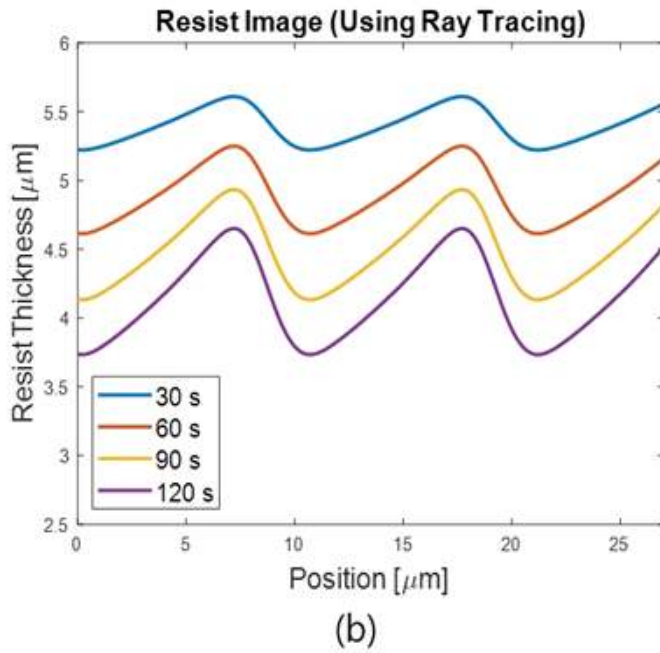
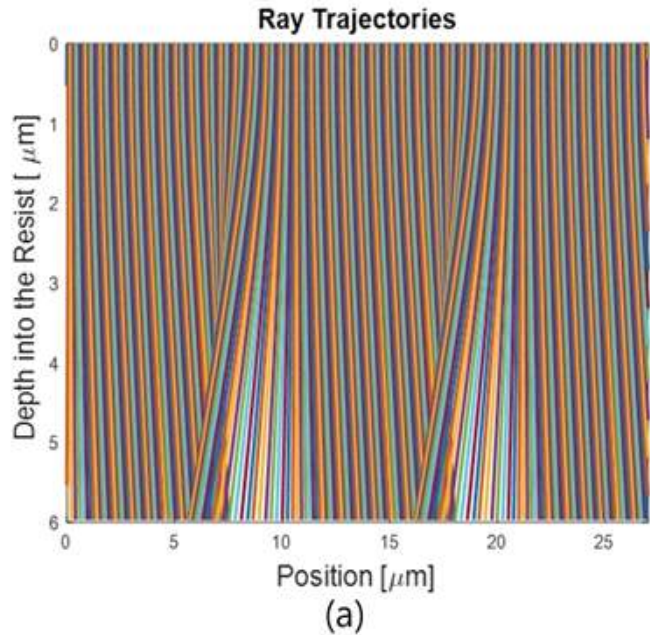


그림 9 예비 시뮬레이션 조건에 대한 (a) 현상 광선의 궤적, (b) 현상 시간별 포토레지스트의 형상 시뮬레이션 결과

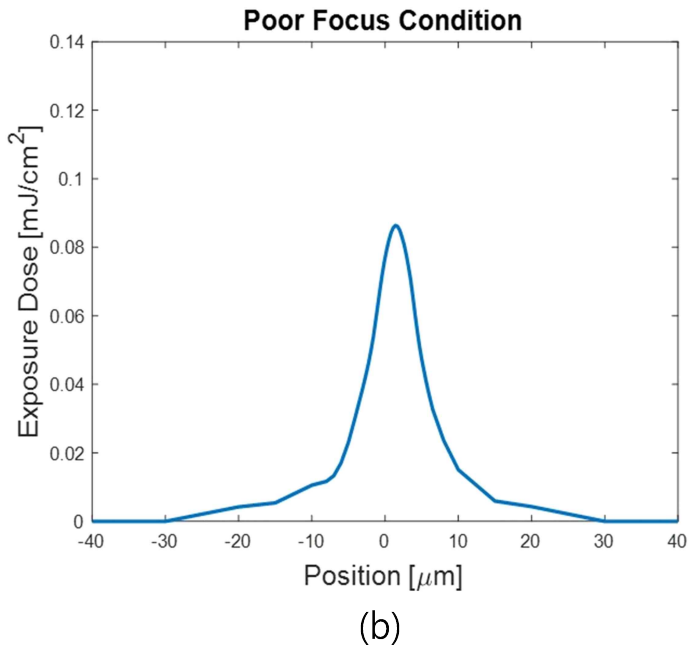
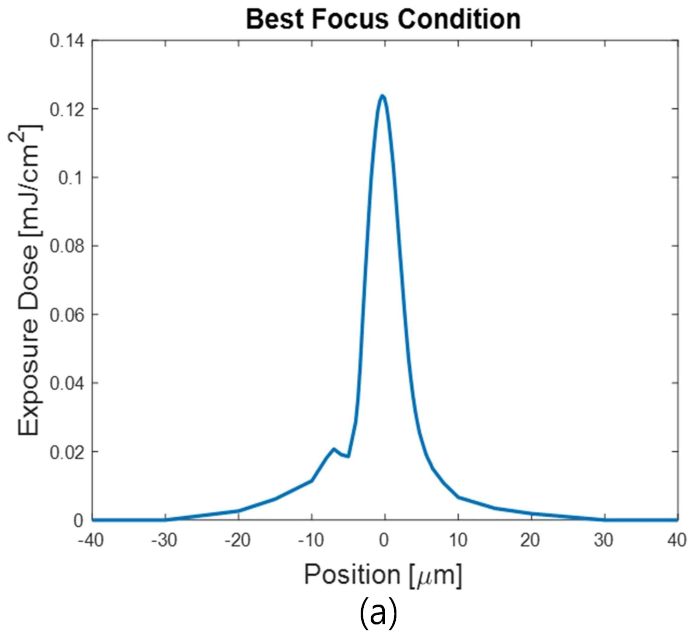


그림 10 측정된 MLT 시스템의 픽셀 이미지: (a) 최상 초점 조건, (b) 불량 초점 조건

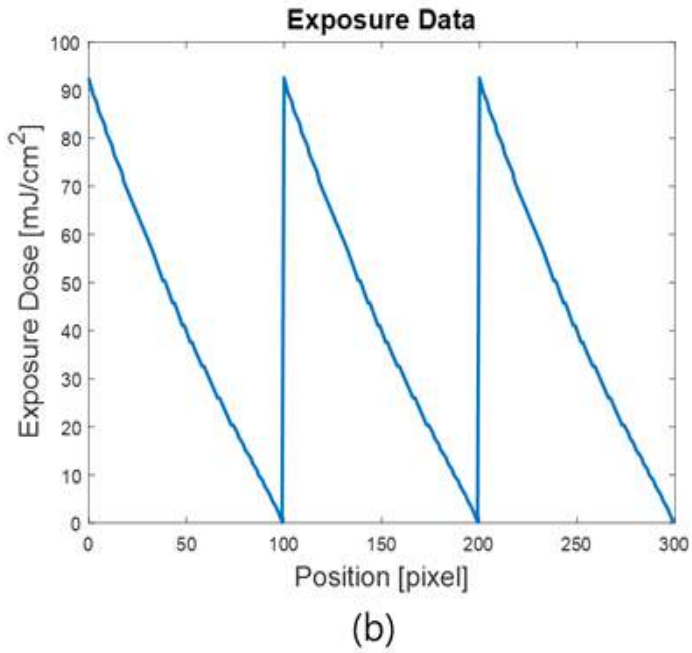
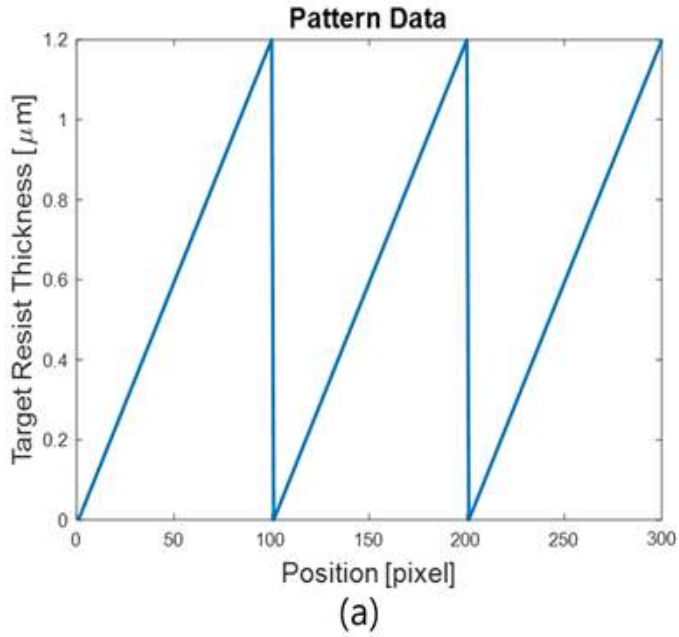


그림 11 주기가 100 pixel인 톱니 패턴에 대한 (a) 패턴 데이터, (b) 노광 데이터

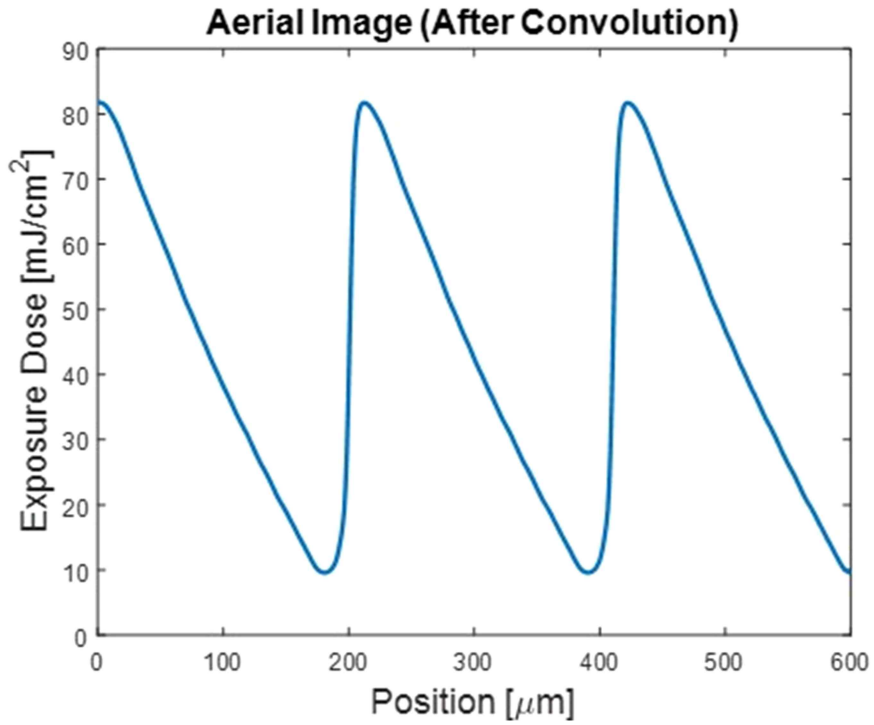
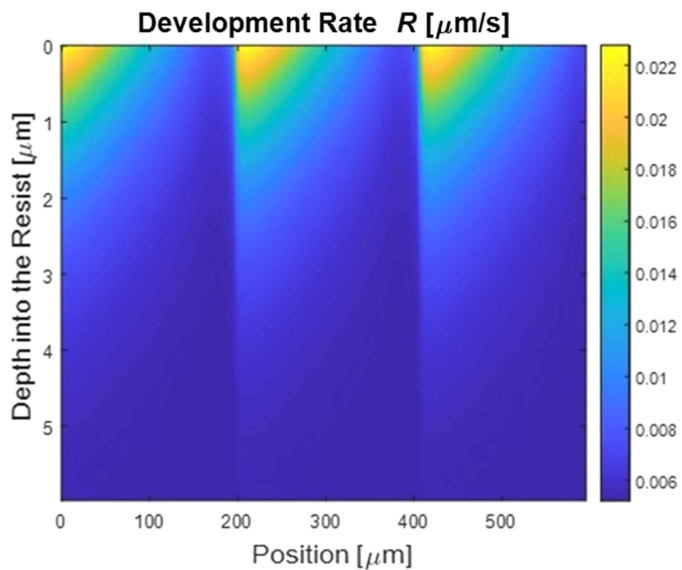
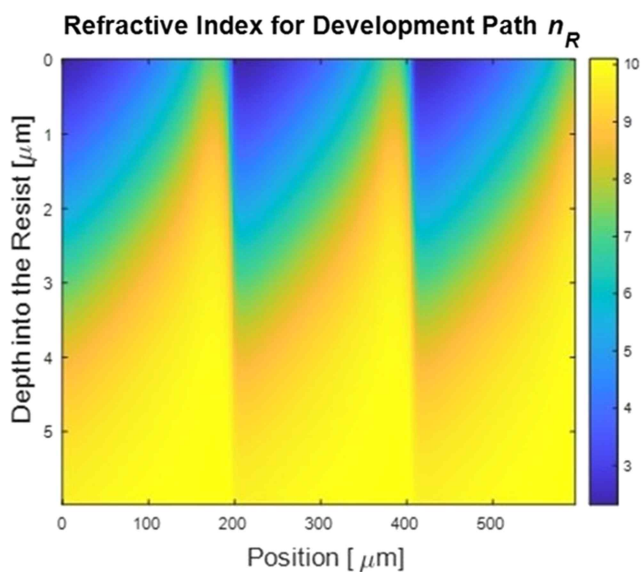


그림 12 최상 초점 조건 픽셀 이미지를 사용하였을 때 주기가 100 pixel 인 톱니 패턴에 대한 에어리얼 이미지



(a)



(b)

그림 13 최상 초점 조건 픽셀 이미지를 사용하였을 때 주기가 100 pixel인
 톱니 패턴에 대한 (a) 포토레지스트의 용해 속도 R 의 분포, (b) 현
 상 경로에 대한 굴절률 n_R 의 분포

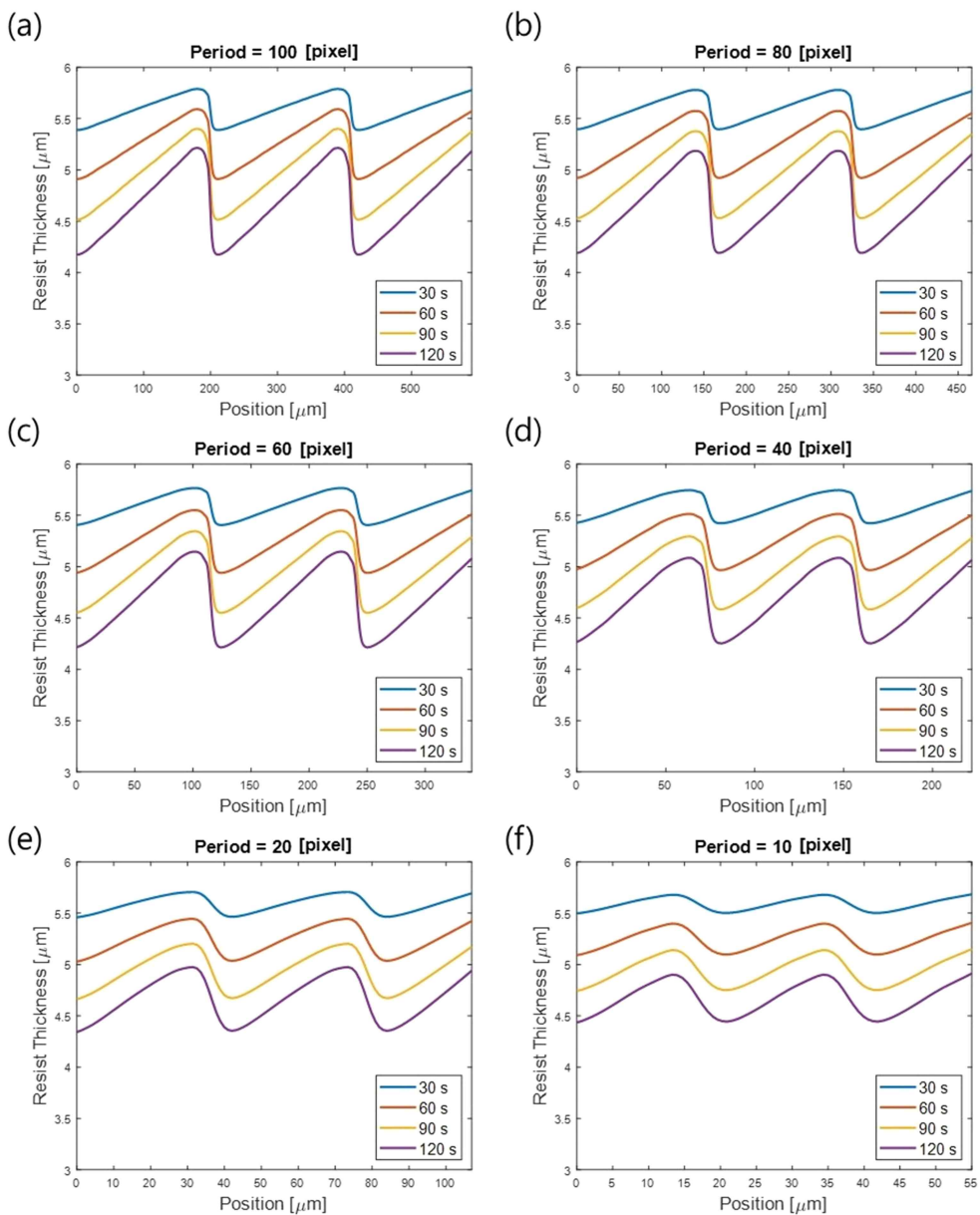


그림 14 최상 초점 조건 픽셀 이미지를 사용하였을 때 현상 시간별 포토레지스트의 형상 시뮬레이션 결과. (a) 주기: 100 pixel, (b) 주기: 80 pixel, (c) 주기: 60 pixel, (d) 주기: 40 pixel, (e) 주기: 20 pixel, (f) 주기: 10 pixel

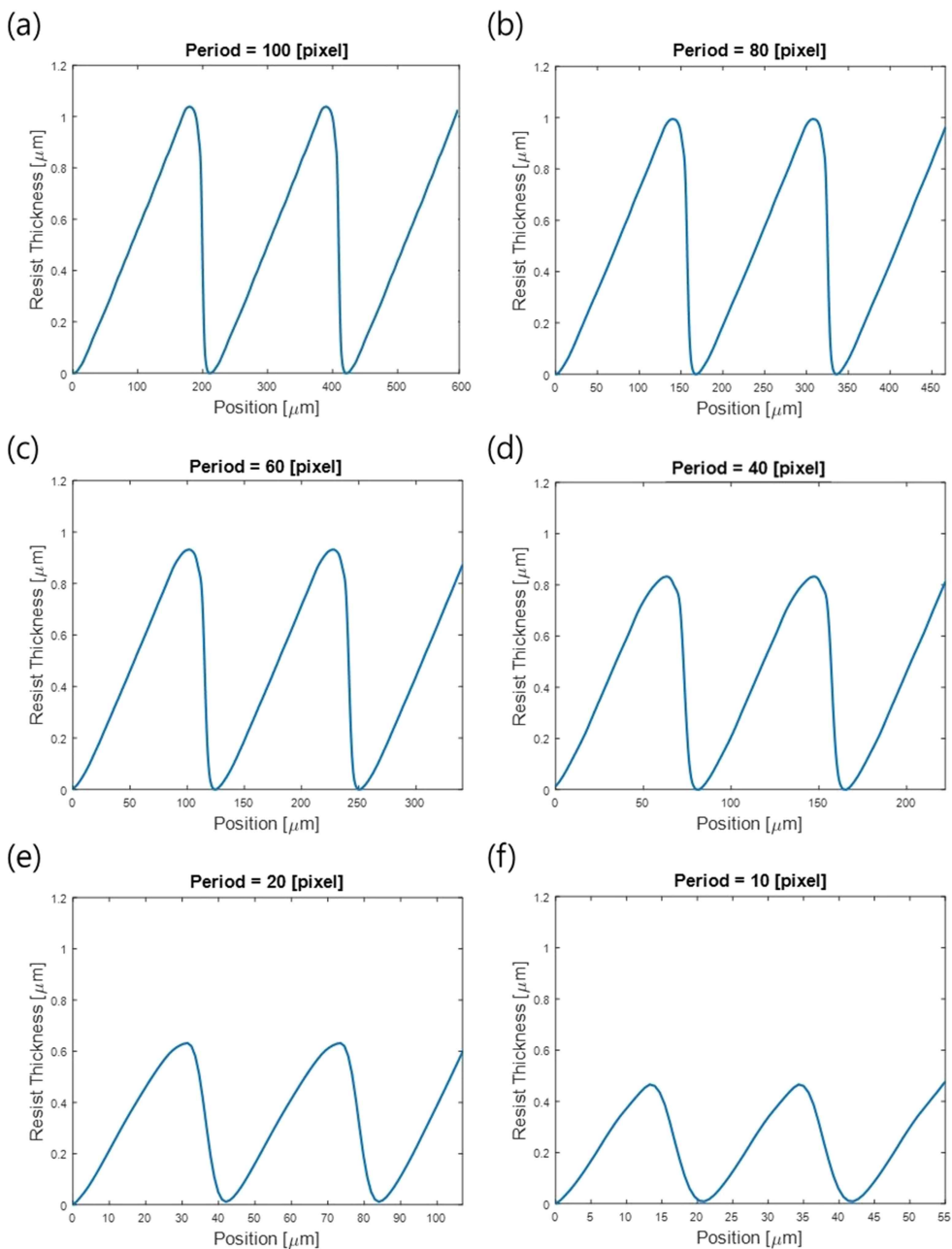


그림 15 최상 초점 조건 픽셀 이미지를 사용하였을 때 포토레지스트 형상 시뮬레이션 결과(현상 시간: 120 s). (a) 주기: 100 pixel, (b) 주기: 80 pixel, (c) 주기: 60 pixel, (d) 주기: 40 pixel, (e) 주기: 20 pixel, (f) 주기: 10 pixel

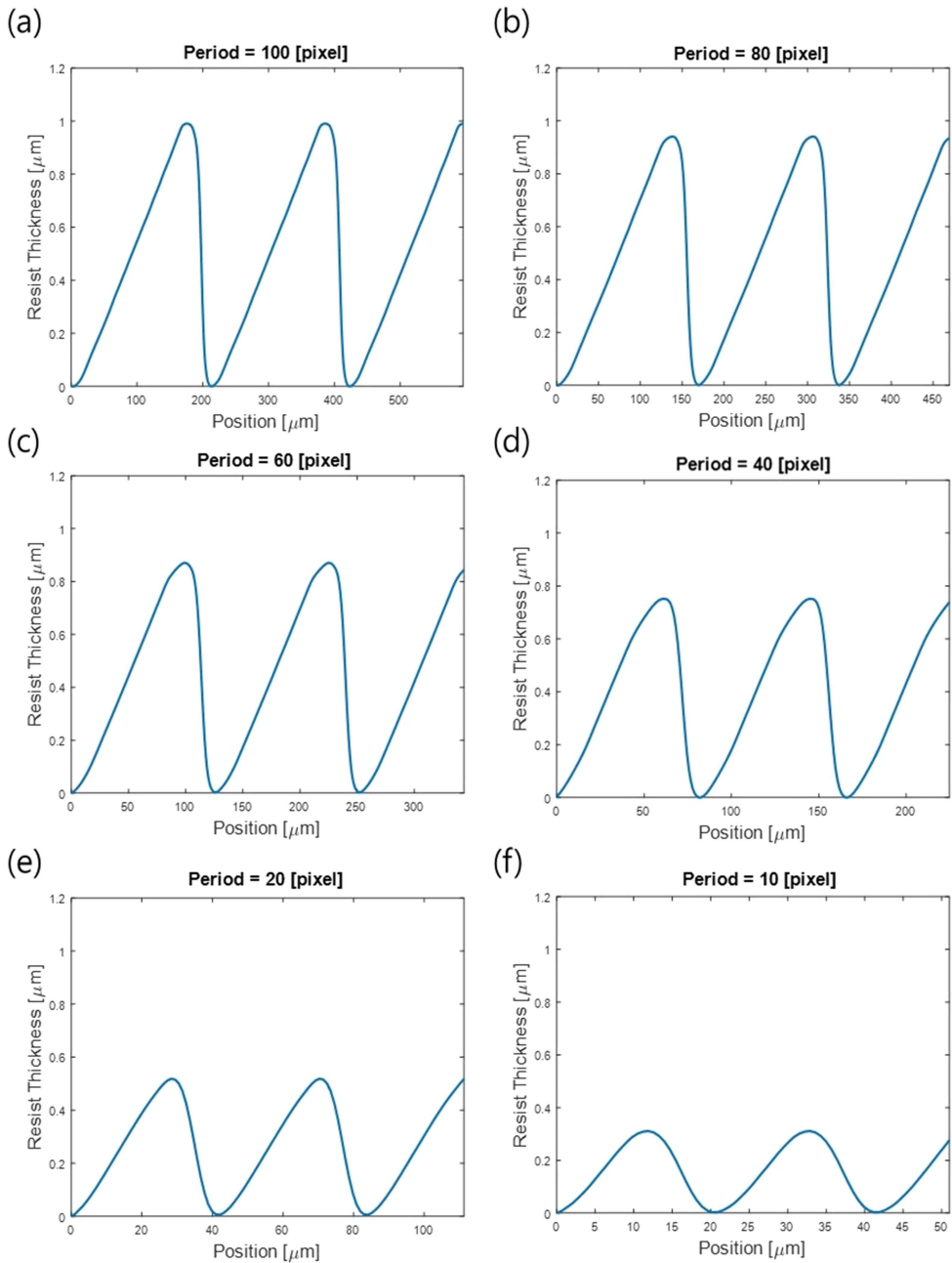


그림 16 불량 초점 조건 픽셀 이미지를 사용하였을 때 포토레지스트 형상 시뮬레이션 결과(현상 시간: 120 s). (a) 주기: 100 pixel, (b) 주기: 80 pixel, (c) 주기: 60 pixel, (d) 주기: 40 pixel, (e) 주기: 20 pixel, (f) 주기: 10 pixel

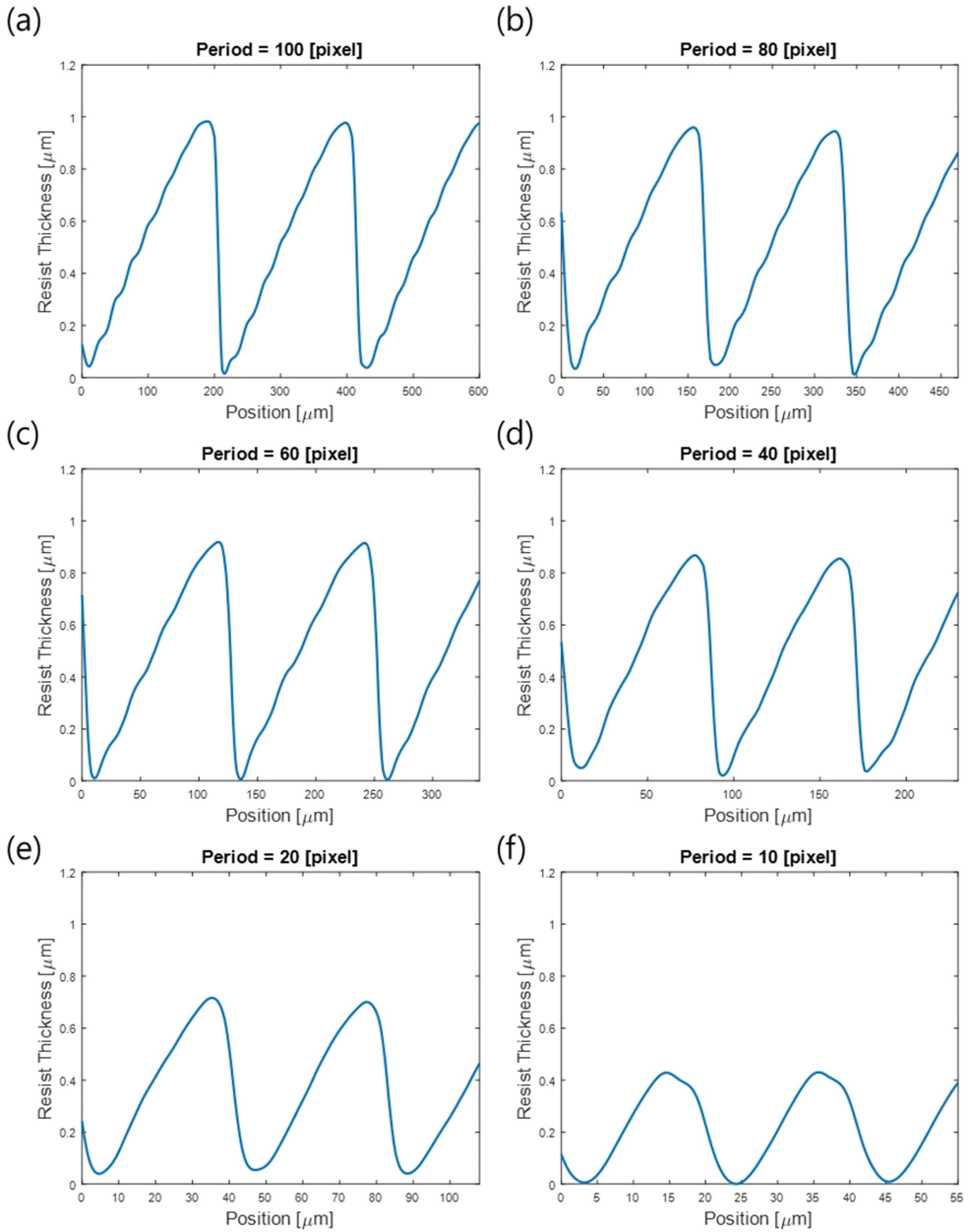


그림 17 최상 초점 조건일 때 포토레지스트 형상 측정 결과(현상 시간: 120s).

(a) 주기: 100 pixel, (b) 주기: 80 pixel, (c) 주기: 60 pixel, (d) 주기: 40 pixel, (e) 주기: 20 pixel, (f) 주기: 10 pixel

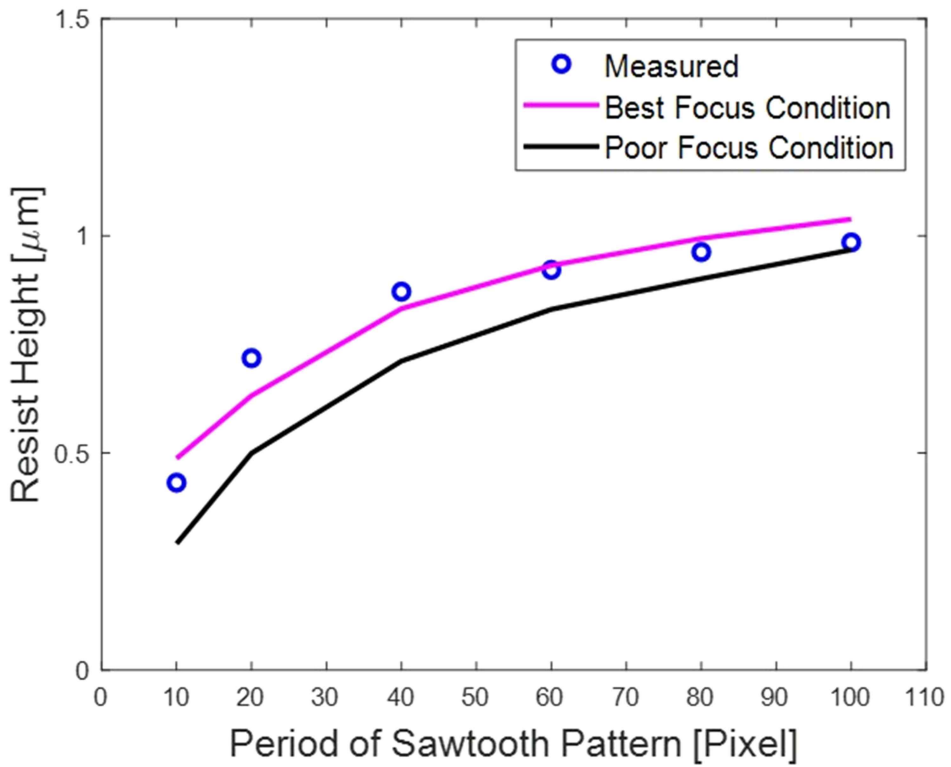


그림 18 최적 초점 조건 픽셀 이미지와 불량 초점 조건 픽셀 이미지를 측정 결과와 비교

제5장 결론

본 논문에서는 노광 공정에 대한 Dill 모델과 현상 공정에 대한 Mack 모델을 활용하여 포토레지스트의 특성 파라미터를 측정하였다. Dill 모델의 파라미터 중 A 와 B 파라미터는 노광하지 않은 포토레지스트 샘플과 충분히 노광한 포토레지스트 샘플을 사용하여 측정한 흡수계수를 통해 직접적으로 결정하였다. Dill 모델의 C 파라미터는 완전해를 사용하여 이론적으로 계산한 노광량에 따른 투과율과 실험적으로 측정한 투과율 사이의 오차를 분석하여 간접적으로 결정하였다. Mack 모델의 R_{\min} , R_{\max} 파라미터는 노광하지 않은 포토레지스트 샘플과 충분히 노광한 포토레지스트 샘플을 사용하여 측정한 현상 시간별 용해 속도를 통해 직접적으로 결정하였다. Mack 모델의 a 와 n 파라미터는 현상 시간에 따른 노광량별 포토레지스트 두께 변화를 이론적으로 계산하고 측정된 결과와의 오차를 분석하여 간접적으로 결정하였다. 파라미터 n 만을 사용하는 간략화된 Mack 모델의 경우에도 동일한 방법을 분석을 수행하였으며 a 와 n 파라미터를 사용하는 Mack 모델이 n 파라미터만 사용하는 간략화된 Mack 모델보다 오차가 작음을 확인하였다.

광선추적법을 적용하여 현상 공정 후 포토레지스트 형상에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 위한 에어리얼 이미지 계산을 위해 측정된 픽셀 이미지를 사용하였다. 다양한 주기($21\mu\text{m} \sim 210\mu\text{m}$)를 갖는 톱니 패턴에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며 실험적으로 측정된 결과와 비교, 분석하였다. 톱니 패턴의 주기가 작아짐에 따라 포토레지스트 형상의 높이 또한 작아지는 경향을 나타내었다. 최적 초점 조건에서 측정된 픽셀 이미지를 사용한 시뮬레이션 결과와 실험적으로 측정된 결과가 서로 잘 일치함을 확인하였다.

본 논문에서 정리한 시뮬레이션 방법과 측정된 포토레지스트의 특성 파라미터를 사용하여 광근접효과 보정(Optical Proximity Effect Correction, OPC)에 대한 후속 연구를 진행할 예정이다.

[참고문헌]

- [1] 광노열, 배병욱, 오경택, 윤태균, 이성희, 임정훈, 정용우, 진수봉, 최호승, 홍기환, 반도체 제조기술의 이해 (2판) (한울출판사), pp. 321-324.
- [2] C. A. Mack, Field Guide to Optical Lithography, 1st ed. (SPIE, Bellingham, USA, 2006), pp. 1-8.
- [3] B. J. Lin, Optical Lithography: Here Is Why, 1st ed. (SPIE, Bellingham, USA, 2010), pp. 1-3.
- [4] C. A. Mack, Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication, 1st ed. (Wiley, Chichester, England, 2007), pp. 15-24.
- [5] B. J. Lin, Optical Lithography: Here Is Why, 1st ed. (SPIE, Bellingham, USA, 2010), pp. 167-170.
- [6] H. J. Levinson, Extreme Ultraviolet Lithography, 1st ed. (SPIE, Bellingham, USA, 2020), pp. 111-126.
- [7] R. L. Brainard, M. Neisser, G. Gallatin, and A. Narasimhan, "Photoresists for EUV lithography," in EUV Lithography, 2nd ed., V. Bakshi, Ed. (SPIE, Bellingham, USA, 2018), pp. 493-591.
- [8] F. H. Dill, "Optical lithography," IEEE Trans. Electron. Devices 22, 440-444 (1975).
- [9] F. H. Dill, W. P. Hornberger, P. S. Hauge, and J. M. Shaw, "Characterization of positive photoresist," IEEE Trans. Electron Devices 22, 445-452 (1975).
- [10] F. H. Dill, A. R. Neureuther, J. A. Tuttle, and E. J. Walker, "Modeling projection printing of positive photoresists," IEEE Trans. Electron Devices 22, 456-464 (1975).
- [11] C. A. Mack, "Development of positive photoresists," J. Electrochem. Soc. 134, 148-152 (1987).
- [12] H. J. Levinson, Principles of Lithography, 2nd ed. (SPIE, Bellingham, USA, 2005), pp. 70-72.
- [13] C. A. Mack, Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication, 1st ed. (Wiley, Chichester, England, 2007), pp. 223-230.

- [14] Owa, S., & Nagasaka, H., Immersion lithography: its potential performance and issues. (SPIE, Vol. 5040, 2003) pp. 724-733.
- [15] C. A. Mack, Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication, 1st ed. (Wiley, Chichester, England, 2007), pp. 191-195.
- [16] C. A. Mack, Field Guide to Optical Lithography, 1st ed. (SPIE, Bellingham, USA, 2006), pp. 41-52.
- [17] S. V. Babu and E. Barouch, "Exact solution of Dill's model equation for positive photoresist kinetics," IEEE Electron. Device Lett. 7, 252-253 (1986).
- [18] C. A. Mack, Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication, 1st ed. (Wiley, Chichester, England, 2007), pp. 257-261.
- [19] Baues, P, "Huygens' principle in inhomogeneous, isotropic media and a general integral equation applicable to optical resonators," Opto-electronics, 1, pp. 37-44 (1969).
- [20] Brunner, T. A., & Ferguson, R. A., "Approximate models for resist processing effects," SPIE. Vol. 2726, 198-207 (1996).
- [21] J. Helmsen et al, "Two new methods for simulating photolithography development in 3D," SPIE. Vol. 2726, 253 - 261 (1996).
- [22] Saleh, B. E., & Teich, M. C., FUNDAMENTALS OF PHOTONICS, 3rd ed. (John Wiley & Sons, New Jersey, USA, 2019), pp. 20-23.
- [23] Hu, J. W., & Tang, H. M. Numerical methods for differential equations. (City University, Hong Kong, 1999) pp. 591-612 .
- [24] Butcher, J. C. "A history of Runge-Kutta methods," Applied numerical mathematics, 20(3), 247-260 (1996).
- [25] Tamkin, J. M., Bagwell, B., Kimbrough, B., Jabbour G. and Descour, M., "High Speed Gray Scale Laser Direct Write Technology for Micro-Optic Fabrication," Proc. of SPIE Vol. 4984, 210-218 (2003).
- [26] Park, J. R., Kim, Y. and Milster, T. D., "Analysis of a Laser Direct Writer with an Acousto-optic Modulator Employed for Dose Gray-scaling," J. Korean Phys. Soc. 59(5), 3289-3292 (2011).
- [27] Park, J. R., Sierchio, J., Zaveron, M., Kim, Y. and Milster, T. D., "Characterization of photoresist and simulation of a developed resist profile for the

- fabrication of gray-scale diffractive optic elements,” *Opt. Eng.* 51(2), 023401 (2012).
- [28] Goodman, J. W., *Introduction to Fourier Optics*, Roberts & Company Publishers, 3-29 (2005).
- [29] Park, J. R., Kim, H. S., Kim, J.-T., Sung, M.-G., Cho, W.-I., Choi, J.-H. and Choi, S.-W., “Laser Process Proximity Correction for Improvement of Critical Dimension Linearity on a Photomask,” *ETRI J.* 27(2), 188-194 (2005).
- [30] Gautschi, W. “Efficient computation of the complex error function,” *SIAM Journal on Numerical Analysis.* 7(1), 187-198 (1970).
- [31] Li, J., & Wu, S. T. “Extended Cauchy equations for the refractive indices of liquid crystals,” *Journal of applied physics.* 95(3), 896-901 (2004).
- [32] Fujifilm Electronic Materials. (2005). AP2210A: Positive acting aqueous buffer coat material [Brochure]. Fujifilm Electronic Materials.
- [33] Jewett, R. E., Hagouel, P. I., Neureuther, A. R., & Van Duzer, T. “Line Profile resist development simulation techniques,” *Polymer Engineering & Science.* 17(6), 381-384 (1977).