



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 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](#)

碩士學位論文

OPC와 SLM을 이용한  
Maskless lithography 연구



濟州大學校 大學院

에너지 工學科

梁 種 根

2015年 2月

# OPC와 SLM을 이용한 Maskless lithography 연구

指導教授 李 憲 周

梁 種 根

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2014年 12月



梁種根의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 劉 榮 勳 印

委 員 千 院 基 印

委 員 李 憲 周 印

濟州大學校 大學院

2014年 12月

# Study on Maskless lithography using OPC and SLM

Jong-Keun Yang  
(Supervised by Professor Heon-Ju Lee)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement  
for the degree of Master of Science

2014. 12.

This thesis has been examined and approved.



.....  
Thesis director, Heon-Ju Lee, Prof. of Nuclear and Energy Engineering

.....  
Won-Gee Chun, Prof. of Nuclear and Energy Engineering

.....  
Young-Hun Yu, Prof. of Physics

Date 2014. 12.

Department of Nuclear & Energy Engineering  
GRADUATE SCHOOL  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목 차

LIST OF FIGURES .....	ii
LIST OF TABLES .....	iv
LIST OF ACRONYMS .....	v
SUMMARY .....	vi
I. 서 론 .....	1
II. 이론적 배경 .....	2
1. Optical lithography .....	2
2. 회절 효과 .....	5
3. 레일리 해상도 .....	7
4. 이미지 보정 .....	12
5. Rule-Based OPC .....	14
III. 실험 장치 및 방법 .....	21
1. 실험 장치 .....	21
2. 실험 방법 .....	25
IV. 실험결과 및 고찰 .....	26
1. Resolution 확인 결과 .....	26
2. 일반적인 OPC를 이용한 이미지 보정 결과 .....	43
3. 회색조 OPC를 이용한 이미지 보정 결과 .....	49
V. 결 론 .....	57
참 고 문 헌 .....	58
감사의 글 .....	63

## LIST OF FIGURES

[Fig. 1] The IC creation process .....	4
[Fig. 2] The scheme of a optical lithography system .....	4
[Fig. 3] Diffraction according to size of hole .....	5
[Fig. 4] Diffraction pattern .....	6
[Fig. 5] Airy disk shape .....	6
[Fig. 6] The image process of isolated opening with a width of 'd' .....	8
[Fig. 7] The imaging process of a periodic pattern .....	9
[Fig. 8] Conceptual diagram of the pattern correction by OPC .....	13
[Fig. 9] Design image and printed image comparison .....	14
[Fig. 10] Halftone techniques applied in line biasing method .....	16
[Fig. 11] Asymmetric halftone technique applied on both sides of the line .....	16
[Fig. 12] Assisting feature method applied on both sides of the line .....	18
[Fig. 13] Line-shortening reduction OPC .....	19
[Fig. 14] Two-dimensional OPC used to correct the corner rounding .....	20
[Fig. 15] Experimental setup schematic .....	21
[Fig. 16] The experimental setup .....	22
[Fig. 17] Line(20, 400, 40) intensity distribution .....	26
[Fig. 18] Dimension measurement of horizontal part in Line(20, 400, 40) .....	27
[Fig. 19] Dimension measurement of vertical part in Line(20, 400, 40), .....	27
[Fig. 20] Line(15, 400, 40) intensity distribution .....	28
[Fig. 21] Dimension measurement of horizontal part in Line(15, 400, 40) .....	29
[Fig. 22] Dimension measurement of vertical part in Line(15, 400, 40) .....	29
[Fig. 23] Line(10, 400, 40) intensity distribution .....	30
[Fig. 24] Dimension measurement of horizontal part in Line(10, 400, 40) .....	31
[Fig. 25] Dimension measurement of vertical part in Line(10, 400, 40) .....	31
[Fig. 26] Line(15, 400, 20) intensity distribution .....	32
[Fig. 27] Dimension measurement of horizontal part in Line(15, 400, 20) .....	33
[Fig. 28] Dimension measurement of vertical part in Line(15, 400, 20) .....	33
[Fig. 29] Line(5, 400, 20) intensity distribution .....	34
[Fig. 30] Dimension measurement of horizontal part in Line(10, 400, 20) .....	34
[Fig. 31] Dimension measurement of vertical part in Line(10, 400, 20) .....	35

[Fig. 32] Line(5, 400, 20) intensity distribution .....	36
[Fig. 33] Dimension measurement of horizontal part in Line(5, 400, 20) .....	36
[Fig. 34] Dimension measurement of vertical part in Line(5, 400, 20) .....	37
[Fig. 35] Line(10, 400, 20) and space(2 20, 20 2) pattern intensity distribution .....	38
[Fig. 36] Line(10, 400,40) and space(5 20, 20 5) pattern intensity distribution, .....	39
[Fig. 37] Line(15, 400, 20) and space(2 20, 20 2) pattern intensity distribution .....	40
[Fig. 38] Line(15, 400, 40) and space(5 20, 20 5) pattern intensity distribution .....	41
[Fig. 39] Resolution measurement in configured system .....	42
[Fig. 40] Comparison of Line(10, 400, 40) and space (5 20, 20 5) pattern design between uncorrected and corrected by noraml OPC .....	43
[Fig. 41] Comparison of uncorrected and the corrected image .....	44
[Fig. 42] Comparison of uncorrected and the corrected image .....	45
[Fig. 43] Comparison of uncorrected and the corrected ‘ㄱ’ design .....	46
[Fig. 44] Comparison of uncorrected and the corrected ‘ㄱ’ image .....	47
[Fig. 45] Corrected ‘ㄱ’ pattern image by normal OPC .....	48
[Fig. 46] Comparison of ‘ㄱ’ pattern design between normal OPC and gray-level OPC .....	49
[Fig. 47] Comparison of ‘ㄱ’ image between normal OPC and gray-level OPC .....	50
[Fig. 48] Comparison of uncorrected and the corrected ‘ㄱ’ image .....	51
[Fig. 49] Comparison of uncorrected and the corrected ‘ㄱ’ image .....	51
[Fig. 50] Comparison of uncorrected and the corrected Line(15, 400, 40) and space(5 20, 20 5) pattern design .....	52
[Fig. 51] Comparison of uncorrected and the corrected image by gray-level OPC .....	53
[Fig. 52] Line (10, 400, 40) and space (5 20, 20 5) pattern compared to the uncorrected and corrected design .....	54
[Fig. 53] Comparison of uncorrected and the corrected image .....	55
[Fig. 54] Comparison of the results of the corrected image using the magnification .....	56

## LIST OF TABLES

<Table 1> The international technology road map for semiconductors(ITRS) .....	7
<Table 2> Characteristics of experimental setup .....	23
<Table 3> Condition of 'ㄱ' pattern and space pattern .....	23
<Table 4> Condition of line and space pattern .....	24





## LIST OF ACRONYMS

CD: Critical Dimension  
CMOS: Complementary Metal-Oxide Semiconductor  
IC: Integrated Circuits  
ISO: International Organization for Standardization  
ITRS: International Technology Roadmap for Semiconductors  
MOS: Metal-Oxide-Silicon  
NA: Numerical Aperture  
OAI: Off-Axis Illumination  
OML: Optical Maskless Lithography  
OPC: Optical Proximity Correction  
PCB: Printed Circuit Boards  
PSMs: Phase Shift Mask  
RET: Resolution Enhancement Technique  
SLM: Spatial Light Modulator  
TCC: Transmission Cross Coefficient

## SUMMARY

Continuous advancements in microelectronics increase the demand for various portable, user-friendly, and multifunctional electronic devices. This leads product manufacturers to keep changing their products' features and designs and to adopt a small-quantity batch production system to be able to meet their customers' various demands. However, continuous modification of production lines and technologies, such as of PCB, is not time- and cost-effective. Therefore, there is a need for low-cost technology. Employing a new PCB mask replacement technology may yield a low-cost manufacturing process. In practical terms, this means spending less. As a result, price cutting and small-quantity batch production are made possible.

One of the new and relatively effective patterning methods is OML, a low-cost and highly productive micropatterning method.

OML uses SLM to print the pattern. It has the advantage of being able to easily output a variety of patterns. However, it cannot use all the diffracted light to print the image, because of the inevitable image distortion.

Therefore, the OPC method is being actively studied for the correction of the diffraction effects or the reduction of process errors.

In this study, a gray-level OPC was used for pattern design to correct the image. The optical system was configured to print the pattern using SLM as a way of using OML to form a micropattern. The results showed the possibility of using the gray-level OPC instead of the conventional OPC.

# I. 서론

컴퓨터, 휴대폰, 웨어러블 기기가 소비자들에게 관심을 끌기 위해 투박한 디자인에서 벗어나 패션요소를 강조하고 하루가 다르게 발전하는 과학기술을 반영해야 하는 흐름에 따라 다품종 소량생산이 필수 불가결하다. 이에 따라 반도체 산업에서는 변화된 제품생산 환경을 위한 제작 공정의 변화가 필요하다. 현재 반도체 제품 제조 공정에서, 중요한 공정중 하나는 석판 인쇄기술 공정이다. 석판인쇄를 위해서는 MASK가 필수적이다. 그리고 MASK 제작비용이 고가임에 따라 생산비용 절감, 휴대성을 위한 패턴의 초소형화, 빠른 생산성을 위하여 마스크 제작비용을 절감시키는 연구와 미세패턴형성을 위한 고해상도 분해능연구가 진행되고 있다. 이러한 흐름에 따라 미세패턴을 형성하는 방법으로 OML(Optical Maskless Lithography)이 각광받고 있다. 이 방법은 근접노광 방식이나 투영노광 방식에서 공통적으로 사용되고 있는 Photo Mask를 제외하고 SLM(Spatial Light Modulator)을 이용하여 패턴을 얻는 방식이다. 이를 이용하면 기존에 사용되던 시스템을 활용가능하다는 강점뿐만 아니라 Mask 제작비용이 절감되며 다양한 패턴을 손쉽게 출력할 수 있는 장점과 일반 마스크와 달리 흑백 대신 회색조 영상을 이용할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 OML-OPC는 디스플레이의 pixel 사이즈 한계에 의한 이미지보정에 한계가 있다.

따라서, 본 연구에서는 디스플레이의 pixel 사이즈가 최소 보정 이미지보다 큰 경우, 미세패턴을 형성시키기 위하여 Optical Maskless Lithography를 이용하는 방법의 일환으로 SLM을 이용하여 광학 시스템을 구성했다. 출력된 이미지를 보정하기 위하여 광 투과 및 차단하는 기존의 이분법적인 방식이 아닌 마스크리스 리소그래피의 특성을 활용한 회색조 OPC를 도입하여 이미지를 보정했다. 이후 일반적인 OPC 보정 결과와 비교하여 회색조 OPC를 이용한 이미지 보정이 가능함을 확인하였다.

## II. 이론적 배경

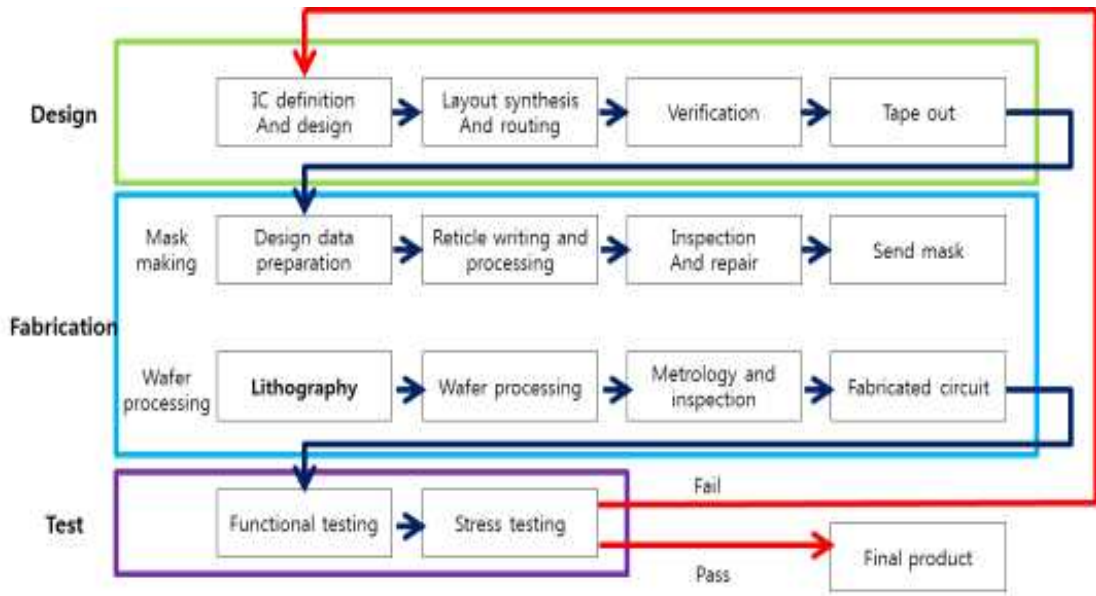
### 1. Optical lithography

현재 이용되고 있는 전자장치의 복잡한 회로는 수백만 개의 트랜지스터를 구축하고 연결하여 제작된다. 이를 제작하는 기술 중에서도 핵심은 광 리소그래피이다. 광 리소그래피 기술은 3,000년 전 발명된 인쇄기술과 유사한 개념이다. 광 리소그래피 시스템에서 마스크는 타겟 회로 패턴이 새겨져있는 필름으로 사용된다. 반도체 웨이퍼위에 코팅된 감광성 중합체(Photo-resist)는 회로패턴이 투사되어 있는 기록 매체로 사용되며 빛은 이처럼 광학 마스크에서 웨이퍼에 회로 패턴을 투영하고 마스크를 통해 전달되는 기록 재료로 사용된다. 반도체 제품을 생산하기 위해서는 일반적으로 20-30회의 리소그래피 공정이 필요하다. 각 리소그래피 공정에는 pattern이 다른 마스크가 필요하다. 1965년에 인텔의 공동 설립자, G. E. 무어에 의해 제안된 무어의 법칙은 컴퓨팅 하드웨어의 역사에서 장기적인 추세를 보이고 있다. 무어의 법칙은 IC의 임계치수가 2년마다 30% 줄어들 것이라고 예측했다. 이러한 경향은 거의 반세기 동안 계속되고 있으며 최소 10년 동안은 지속될 것이라고 예상된다. IC치수는 무어의 법칙에 따라 감소하고 광학 리소그래피는 마이크로 전자공학 기술의 뒤에 중요한 원동력이 되고 있다. 지난 몇 년 동안, 현대 사회는 전자장비 기능과 리소그래피 기술의 극단적인 증가에 의해 변형되고 있다. 광학 리소그래피의 두 가지 주요 요인은 과학자와 엔지니어의 흥미를 가지게 한다. 첫 번째, 리소그래피가 IC 제조공정의 기본적인 부분이고, IC 제조비용의 약 30%를 차지한다. 두 번째, 리소그래피의 가치향상과 최고성과는 IC와 트랜지스터 속도와 실리콘 면적에서 CD 감소를 결정한다. 상기 기술된 두 가지는 모두 현재 IC 제조 기술에서 가장 어려운 부분 중 하나이다. 현재 시판되고 있는 광 리소그래피 시스템은 IC 패턴의 이미지를 40 nm보다 작게 만들 수 있다. 그러나 지속적으로 축소되는 웨이퍼 위에 인쇄되는 패턴의 치수의 왜곡과 웨이퍼에 투영된 회로 패턴의 블러링은 광의 회절과 간섭 효과에 의한 결과이

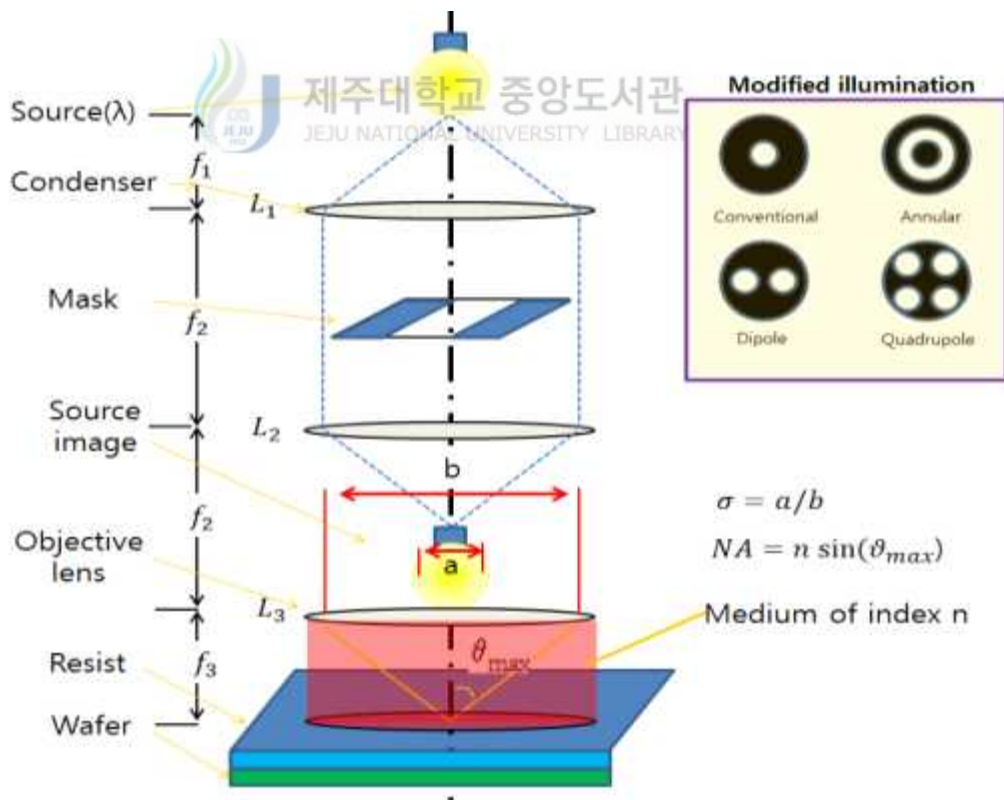
다. 광 리소그래피 시스템의 해상도 한계는 빛의 파장과 전체 이미징 시스템의 구조와 연관되어 있다. 광 리소그래피 시스템의 해상도 한계까지 전자 산업은 보상하고 그들이 반도체 웨이퍼 상에 투영되는 마스크의 왜곡을 최소화하기 위해 해상도 향상 기술(RET)에 의존하여왔다. RET기술에는 OPC, PSM, OAI가 있다.

광 리소그래피는 집적 회로 제조의 핵심이다. 일반적으로 IC 제작 프로세스는 설계, 제조 및 테스트 세 단계로 나뉘며 그림 1.1에 자세하게 나타냈다.

첫 번째 단계는 IC 제품을 정의하고 설계하는 것이다. 이 단계에서는 amplifiers, inverters, adders, flip-flops, multiplexers와 같은 추상적인 기능 단위는 Metal-Oxide-Silicon(MOS) 트랜지스터와 같이 물리적으로 연결된 요소로 변환된다. 이어서 물리적으로 연결된 요소의 설계 결과는 원하는 회로 패턴을 광 리소그래피 공정을 거쳐 웨이퍼 위에 복제되는 마스크에 새겨진다. 이는 제조의 공정에 이용된다. 전체 IC 제작 프로세스 중에 광 리소그래피는 중요한 역할을 하고 IC 크기의 소형화에 핵심적인 역할을 한다. 프린팅과 유사하게, 광 리소그래피는 웨이퍼 위에 회로 패턴을 인쇄하는데 빛과 MASK를 이용한다. 광 리소그래피 시스템은 조명광학계, 마스크, 노광 장치와 웨이퍼 4 개의 기본적인 부분을 포함한다. 그림 2에서  $n$ 은 렌즈를 둘러싼 매질의 굴절률이다.  $\theta_{\max}$ 는 웨이퍼 상에 노광 광의 최대 허용 입사각이다. 광 리소그래피 시스템의 개구수 (Numerical Aperture, NA)는  $NA = n \cdot \sin\theta_{\max}$ 로 정의된다. 부분 간섭 계수 (the partial coherence factor)는 조명의 물리적 범위를 측정한다. 부분 간섭 계수가 커질수록 조명이 커지고 광원의 간섭은 작게 나타난다.  $\sigma = a/b$ 로 계산되며 그림 2에서  $a$ 로 표현된 소스 이미지의 크기와 pupil 크기인  $b$ 사이의 비율로 정의된다. pupil은 광을 포집하는데 사용할 수 있는 렌즈 개구의 물리적 크기이다.



[Fig. 1] The IC creation process

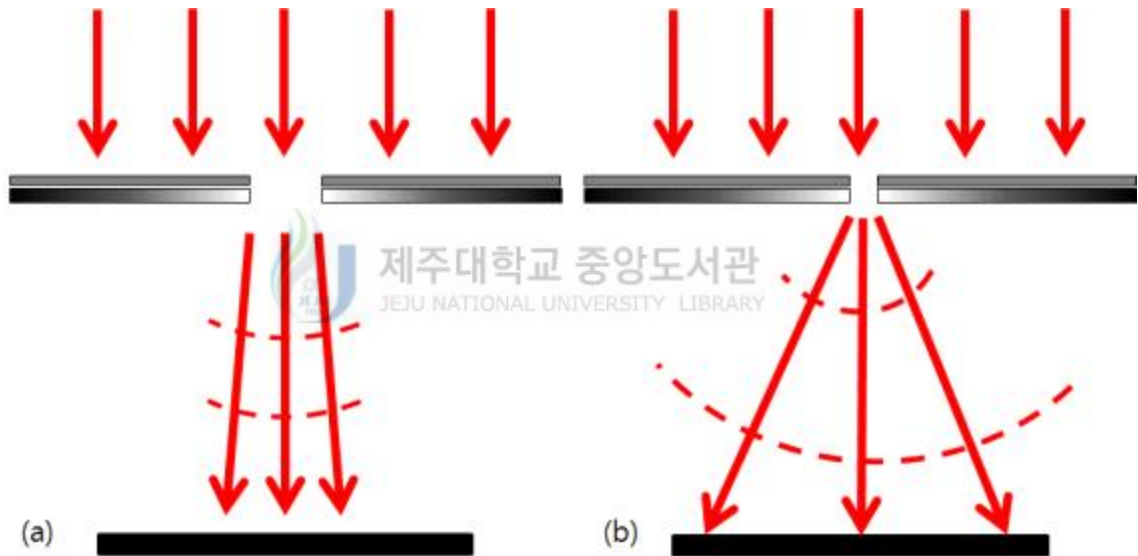


[Fig. 2] The scheme of a optical lithography system

## 2. 회절 효과

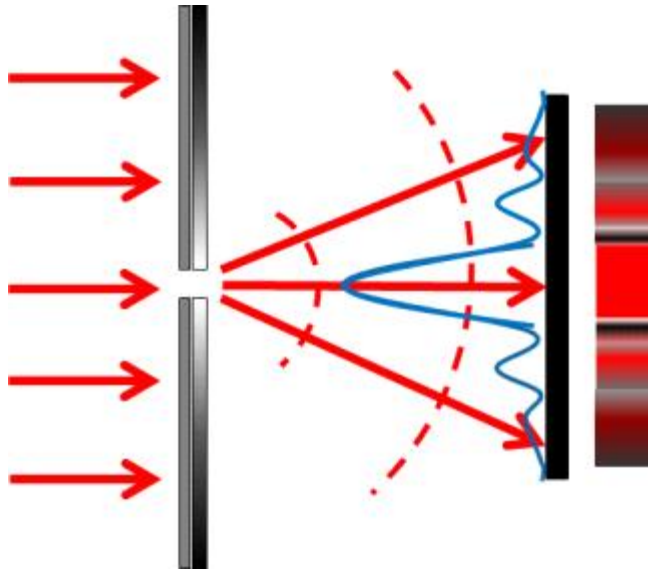
구멍을 통과한 빛은 회절을 일으킨다. 회절(diffraction)은 구멍을 통과한 파동이 구멍과 같은 분명한 그림자를 만드는 대신에 구멍의 뒤쪽으로 퍼지는 현상을 말한다. 회절은 구멍의 크기가 파장의 크기 정도일 때 가장 잘 일어난다. 수면파에서 쉽게 볼 수 있으며, 광파의 경우에도 회절효과를 볼 수 있다. 빛이 좁은 슬릿을 통과할 때에도 밝고 어두운 모양의 회절무늬가 생긴다. 회절현상은 기하광학으로 설명할 수 없다. 회절효과는 기하학적 효과가 아니며 광학기기의 분해능에 근원적인 한계를 갖도록 한다.

작은 구멍을 통과하는 광은 발산하고 간섭현상으로 인하여 서로를 방해한다. 광의 간섭현상은 투과하는 광의 파장과 구멍의 크기가 중요하다.



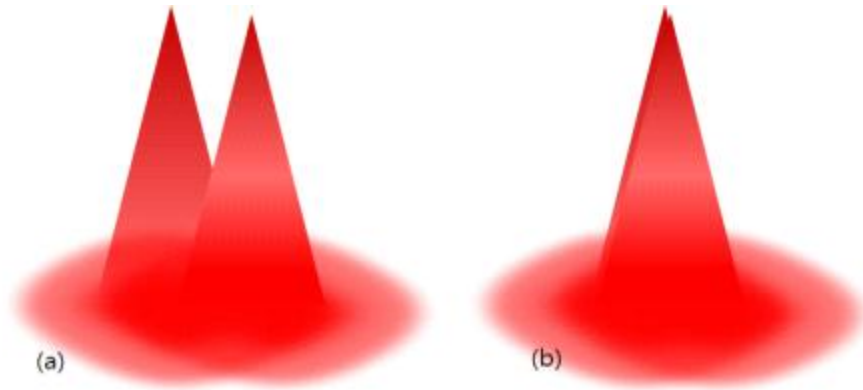
[Fig. 3] Diffraction according to size of hole  
(a) large aperture (b) small aperture

투과하여 발산되는 광은 서로 다른 방향으로 이동하기 때문에 일부는 위상이 이동하고 서로 간섭하기 시작한다. 이 간섭은 광의 파장의 진폭을 가산시키거나 광을 상쇄시키는 회절패턴을 생성한다. 이를 하나의 라인에서 각 위치에 도달하는 광의 세기를 측정한다면, 밴드 형태로 나타난다.



[Fig. 4] Diffraction pattern

이상적인 원형의 구멍에서 2-D의 회절 패턴은 '에어리 디스크'라고 한다. 에어리 디스크의 폭에 대한 광학 시스템의 이론적 최대 해상도를 의미한다. 따라서 에어리 디스크의 중앙 피크의 직경이 카메라의 화소크기에 비해 크게 되면 화상에 두 개의 에어리 디스크를 구분할 수 있게 되며, 두 개의 에어리 디스크가 절반이상의 폭에서 겹치게 되면 구분할 수 없다.



[Fig. 5] Airy disk shape

(a) 구분할 수 있는 에어리디스크 (b) 구분할 수 없는 에어리 디스크

기본 해상도 한계를 설정하는 회절은 카메라 픽셀 크기나 개수에 대하여 독립적이다. 해상도는 렌즈의 f 넘버, 광원의 파장에 의존한다.



### 3. 레일리 해상도

국제 반도체 기술 로드맵(ITRS, 2007년판)은 무어의 법칙을 나타냈고 표 1에서 그 트렌드를 보인다. 임계치수(CD)는 웨이퍼에 프린트를 할 수 있는 최소 문양의 크기이다. 이는 광 이미징 시스템이 이미지를 구분할 수 있는 기준인 레일리 해상도에 의해 제한된다.

푸리에 광학 렌즈의 특성에 따르면 마스크를 통해 통과하는 빛 에너지는 pupil 평면에 분포하며 이는 마스크 스펙트럼에 비례한다. 마스크 패턴 각각의 공간 주파수들은 회절 차수로 표현된다. 그림 6의 isolated pattern 부분에 나타낸 바와 같이 높은 공간 주파수들은 큰 각도로 전달되는 반면, 마스크의 중심으로부터 관찰되는 낮은 공간 주파수를 가지는 광선은 작은 각도로 이동한다. 다시 말해 낮은 주파수가 pupil의 중심에 가깝게 전달된다. 높은 주파수들은 pupil의 범위 밖이며 렌즈에 의해 수집될 수 없다. 따라서 광 리소그래피 시스템에서의 렌즈의 영향은 마스크 패턴의 어떤 높은 공간 주파수를 차단하는 low pass filter와 같다.

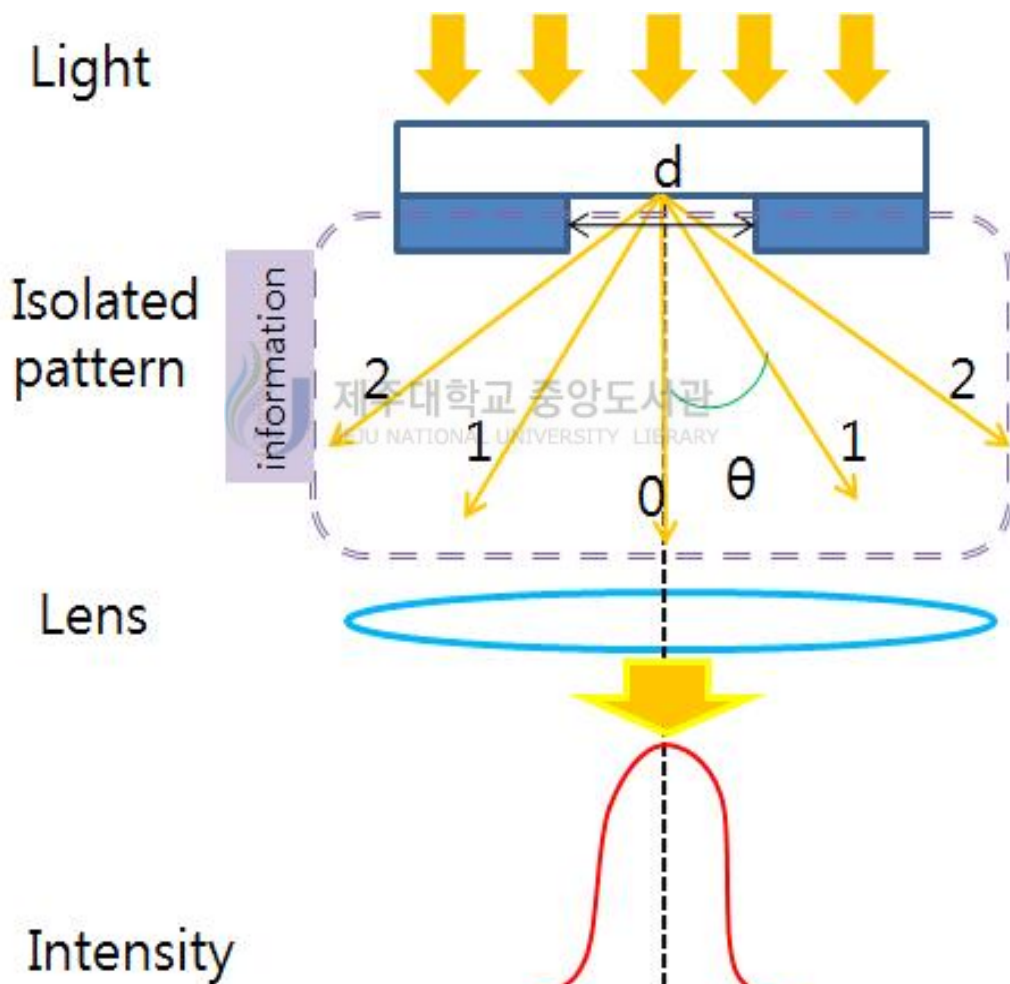


<Table 1> The international technology road map for semiconductors(ITRS)

Technology Node	2009	2010	2011	2012	2013	2014
<b>DRAM</b>						
1/2 pitch (nm)	50	45	40	36	32	28
<b>MPU</b>						
1/2 pitch (nm)	52	45	40	36	32	28
Gate in resist (nm)	34	30	27	24	21	19
Physical gate length (nm)	20	18	16	14	13	11
<b>Mask minimum features</b>						
Norminal image size (nm)	135	120	107	95	85	76
Minimum primary feature size (nm)	94	84	75	67	59	53
Subresolution feature size (nm), opaque	67	60	54	48	42	38

### 3.1 간섭조명

간섭 조명(coherent illumination)하에서 광 리소그래피 시스템을 고려하자. 공간 영역에서 격리된 개구의 스펙트럼은 연속적이고, 신호 스펙트럼의 몇몇의 구성 요소들은 low-pass filter를 항상 통과하고 패턴을 이미징한다. 그림 6은 지름이  $d$ 인 원형문양의 이미징 공정을 보여준다. 그림 7는 주기적인 패턴의 이미징 공정을 보여준다. 주기적인 패턴( $p$ )은  $\Delta k = 2\pi/p$  주기로 별개의 공간 주파수 스펙트럼을 갖는다. 여기서  $p$ 는 주기적인 패턴의 주기이다.



[Fig. 6] The image process of isolated opening with a width of 'd'

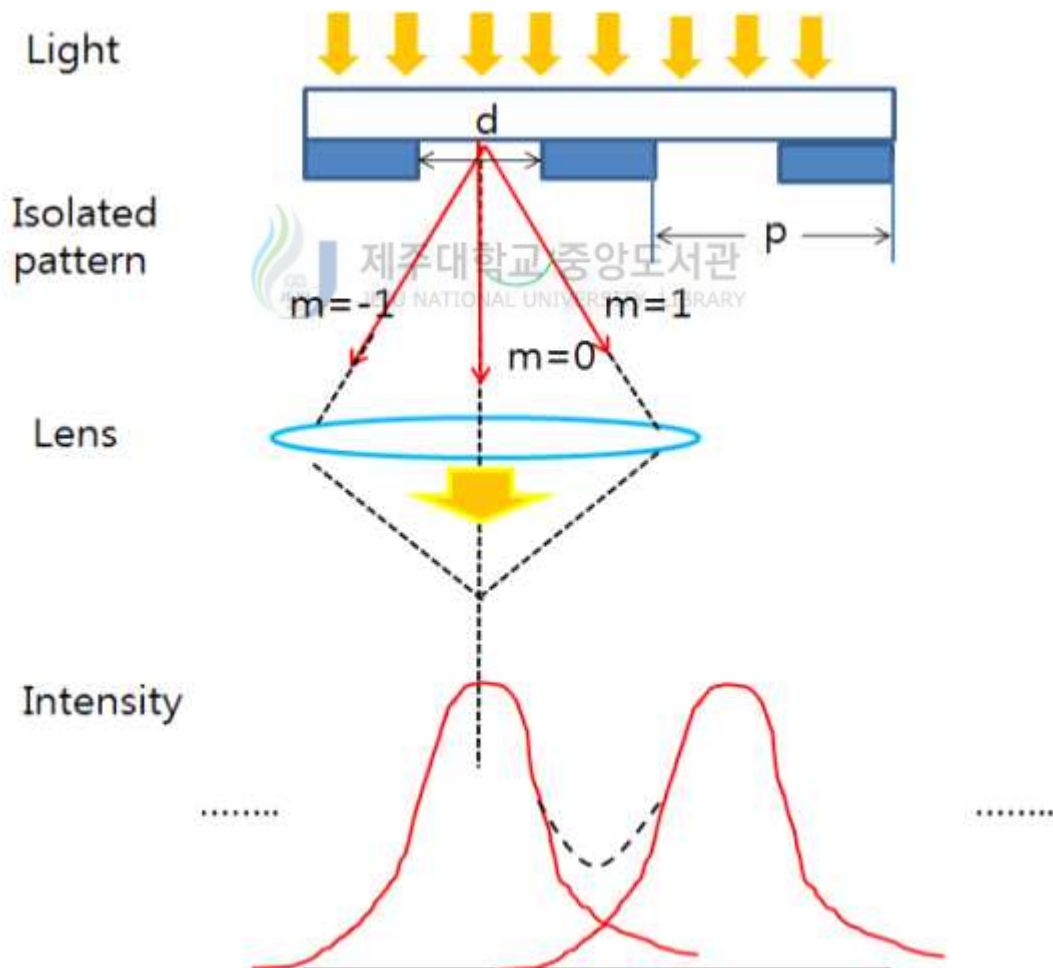
$\lambda$ 는 광원의 파장이다. 최소한 두 개의 회절차수를 이미지에 식별 가능한 강도 변화를 가지는 주기적인 패턴이 필요하다는 것을 증명하고 있다. [3]

식 1.1에 따르면,  $\pm 1$  회절 차수가 low-pass filter를 통과한다면 다음과 같다.

$$\sin\theta_{\max} \geq \lambda/p. \quad (1.1)$$

이에 따라 구별 가능한 최소 피치는 다음과 같이 정의된다.

$$p_{\min} = \lambda/\sin\theta_{\max} = \lambda/NA. \quad (1.2)$$




[Fig. 7] The imaging process of a periodic pattern with a pitch of 'p' and a with of 'd'

위 내용을 정리하면 임계 치수는 다음과 같이 정의된다.

$$CD = \frac{p_{\min}}{2} = \frac{\lambda}{2NA} \quad (1.3)$$

### 3.2 부분 간섭 조명

광원을 부분적으로 투과시키는 부분 간섭 조명 시스템(partial coherent illumination system)에서는 피치와 CD제한이 변경된다. 부분간섭조명의 부분간섭계수( $\sigma$ )는  $0 < \sigma < 1$ 이다. 이는 해상도를 향상시키며, 직관적으로 부분 간섭 조명은 0이 아닌 라인 폭을 가진다. 따라서 부분 간섭 조명 시스템은  $\pm 1$ 회절차수가 low-pass filter를 통과하도록 한다. 따라서 부분 간섭 조명 시스템의 최소 피치는 구별 가능한 간섭 조명 시스템보다 작을 수 있다. 이러한 부분 간섭 조명 시스템에서 구별 가능한 최소 피치는 다음과 같다.



$$p_{\min} = \frac{1}{1+\sigma} \frac{\lambda}{NA} \quad (1.4)$$

그리고

$$CD = \frac{1}{1+\sigma} \frac{\lambda}{2NA} \quad (1.5)$$

부분 간섭 조명의 치수가 지속적으로 확장될 때,  $\sigma$ 가 1보다 큰 경우가 있다. 그러나  $\sigma > 1$ 는 해상도의 향상에 기여하지 않는다. 따라서  $\sigma > 1$ 일 때,

$$p_{\min} = \frac{\lambda}{2NA} \quad (1.6)$$

이고

$$CD = \frac{\lambda}{4NA}. \quad (1.7)$$

레이리 해상도의 상기 설명은 기술에 대한 회절 영향이 적용된다. 포토레지스트 효과, 해상도 향상 등을 포함하기 위하여 공정계수  $k$ 가 광범위한 분해능 한계를 설명하기 위하여 도입된다.

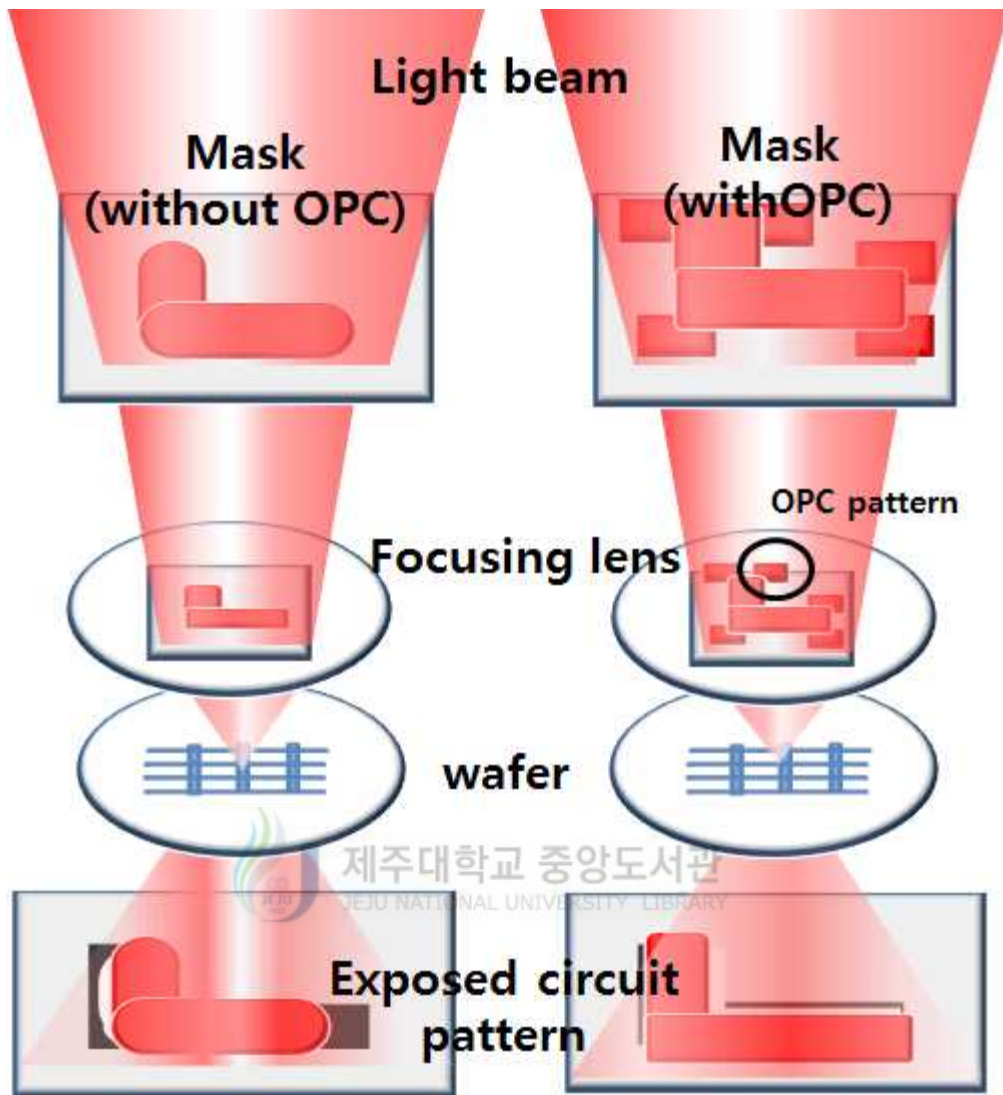
$$R = CD = k \frac{\lambda}{NA}. \quad (1.8)$$



#### 4. 이미지 보정

광학 리소그래피 시스템의 해상도 한계로 인하여 웨이퍼위에 투영되는 상의 보정과 마스크 왜곡의 최소화는 2D와 3D 해상도 향상 기술에 의존한다. 식 1.8에 따르면, 광학 리소그래피에서 해상도는 레일리 기준(Rayleigh's criterion)을 따른다. 해상도를 구하는 수식은  $(R)=k\lambda/NA$ 이다. 여기서  $\lambda$ 는 파장, NA는 Numerical Aperture이고 k는 공정상수이다. 해상도를 향상시키기 위하여 사용될 조명의 파장은 연속적으로 감소시켜야 한다. 반면에 NA는 immersion 리소그래피에 의하여 향상된다. 이때 액체 매질은 전방렌즈와 포토레지스트 사이의 공간에 채워져 있다. 이러한 방법의 차이, RET는 공정계수 k의 최소화하기 위해 적용된다. RET방법은 이미지 왜곡을 미리 보정하는 광학 파면의 국부적 진폭 및 위상을 조작한다. RET 방법에는 OPC, PSM, OAI 주요한 기술 3가지 방법이 있다. 게다가 2세대 RET 방법은 원래의 RET 방법의 보조로 제안되었다. 2세대 RET 방법은 multiple mask exposure lithography, simultaneous source and mask optimization, photoresist tone reversing methods 등 다양한 기술을 포함한다.

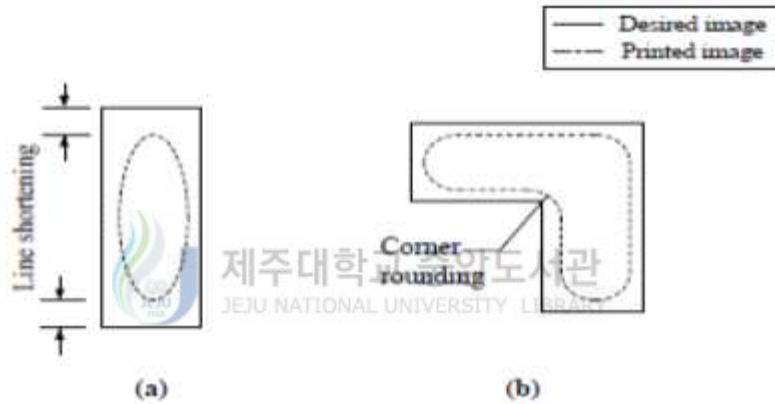
노광 시스템에서 렌즈의 low-pass filtering은 높은 주파수를 차단하고 이미지 왜곡을 초래한다. 일반적으로 이미지 왜곡에는 4가지 경우가 있다. 첫 번째는 동일한 공칭 임계치수와 다른 환경에서 인쇄된 이미지의 변형이다. 두 번째 경우는 인쇄되는 이미지에서 공칭 임계치수의 변화가 선형적이지 않았을 때 발생한다. 세 번째는 라인 쇼트닝(line shortening)이며, 마지막방법은 코너 라운딩(corner rounding)이다. 이러한 이미지 왜곡을 보정하기 위하여, OPC 방법은 출력이 가능한 원하는 패턴에 근접하도록 상기 마스크 패턴에 서브 해상도 피처를 설치하여 문양의 크기를 조절한다. 광 근접 보정의 전형적인 방식은 그림 8에 나타냈다.



[Fig. 8] Conceptual diagram of the pattern correction by OPC

## 5. Rule-Based OPC

광 시스템의 회절, 렌즈, 간섭 효과의 low-pass filtering 특성은 웨이퍼 위에 프린트된 이미지의 왜곡을 발생시킨다. 일반적으로 이미지 왜곡에는 4종류가 있다. 첫 번째, 동일한 공칭 임계 치수를 다른 시스템에 적용하여 인쇄하여 발생한 이미지변화, 두 번째, 공칭 임계 계수가 비선형적으로 변화할 때 발생하는 왜곡, 임계 치수의 감소는 비선형 효과가 증폭시켜 원래 문양과 다르게 이미지가 출력 되도록 한다. 세 번째는 그림 9의 (a)에서 표현된 라인 쇼트닝, 마지막으로 그림 9의 (b)에서 표현된 코너 라운딩이 있다.



[Fig. 9] Design image and printed image comparison  
 (a) Line-shortening (b) Corner-rounding artifacts

그림 9에서, 실선은 출력하고자하는 형상이고 점선은 인쇄되어 출력되는 형상이다. 이 이미지의 왜곡을 보정하기 위하여 OPC 방법은 보조 해상도 피처를 설치하거나 원래의 피처와 패턴을 가능한 가깝게 한다. 기본적으로 4가지의 rule-based OPC 방식이 있다. 첫 번째는 catastrophic OPC라 하며 출력되지 않는 피처를 복구시키는 것이고, 두 번째는 변화하는 환경 또는 비선형 효과에 의한 선폭 변화를 최소화하는 일차원 OPC, 세 번째는 라인 쇼트닝을 줄이는 OPC, 마지막은 코너 라운딩을 보정하는 OPC이다. 이는 일차원 OPC와 대조적으로 X, Y축에서 문양의 형태를 수정한다. 따라서 이러한 접근 방식을 2차원 OPC라고도 한다. [1], [3]]



## 5.1 Catastrophic OPC

Catastrophic OPC의 목적은 마스크상의 피처는 피처사이즈를 제어하지 않고 웨이퍼위에 인쇄될 수 있도록 한다. 따라서 이 방법은 단순히 마스크 위에 상기 타겟의 피처를 크게 디자인함으로써 실현될 수 있다. 그러나 회로의 작동에 대한 이해를 필요로 하는 타겟 패턴의 식별이 요구된다.

## 5.2 One-dimensional OPC

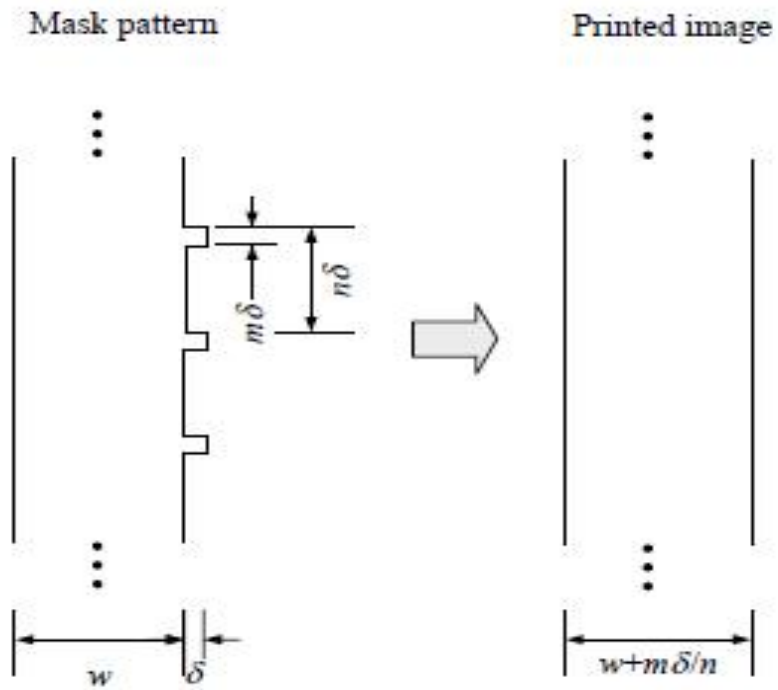
### 1) Line biasing

일반적인 광 리소그래피에서 Line biasing 방법은 중간주기의 라인을 두껍게 하고, 소밀한 선을 얇게 하여 선폭편차를 감소시키는 방법이다. 그러나 선폭 조정 해상도는 마스크위의 픽셀 사이즈에 의하여 제한된다. 따라서 보다 미세한 해상도는 마스크위에 픽셀사이즈를 감소시켜 얻을 수 있다. 그러나 픽셀 사이즈 감소는 마스크 제작 시간을 급격하게 증가시킨다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 하프톤 기술은 해상도와 마스크 제작기간간의 괴리를 완화하기 위하여 적용한다. 식 1.5에 따르면  $\lambda / NA(1+\sigma)$ 보다 작은 공간 주기의 마스크 피처는 광학 시스템에서 확인할 수 없고, 단지 평균 투과율만 출력되는 것이다. 이를 이용한 하프톤 기술은 그림 10에 나타낸 바와 같이 라인의 가장자리에 주기적으로 블록을 추가한다. 그림 10에서 좌측 패턴은 마스크이다.  $\delta$ 은 세그먼트의 높이이고  $m\delta$ 는 폭이다. 세그먼트의 주기는 다음과 같다. [1]

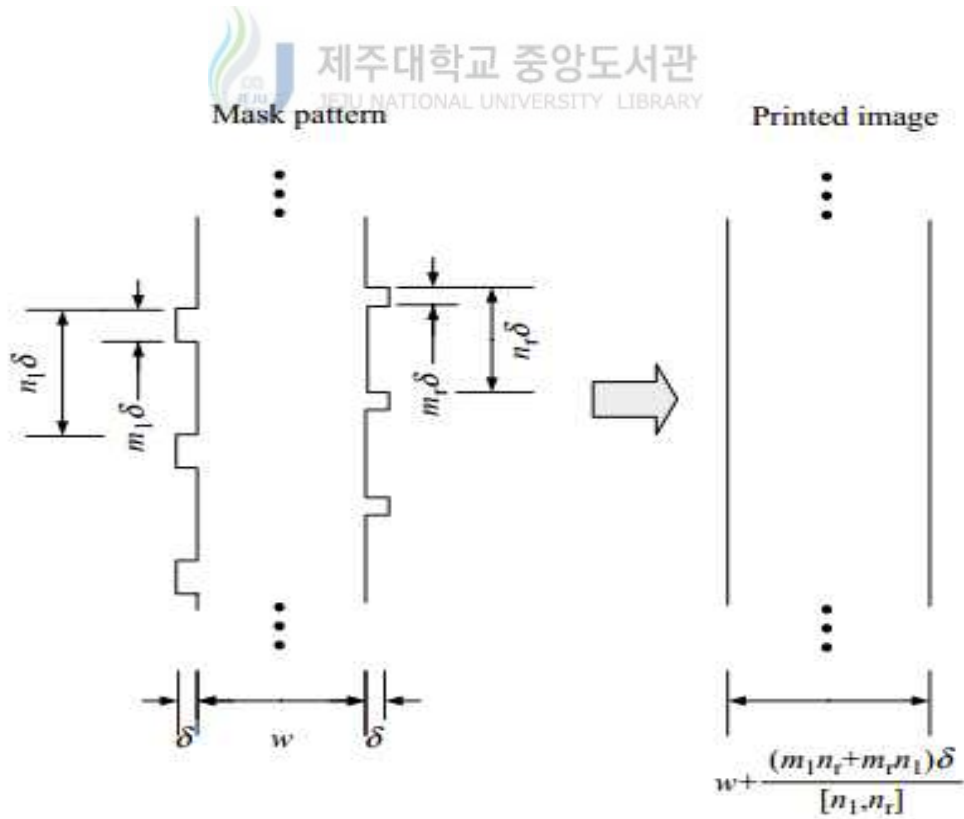
$$n\delta \leq \frac{\lambda}{NA(1+\sigma)}, \quad n \in Z. \quad (5.1)$$

우측 패턴은 마스크의 에지에 인식되지 않는 세그먼트로 보정 후, 출력한 이미지이다. 그러나 평균 투과율( $\delta_{add}$ )은 식 3.2의 폭과 모서리는 그려진다.

$$\delta_{add} = \frac{m\delta}{n} \quad (5.2)$$



[Fig. 10] Halftone techniques applied in line biasing method



[Fig. 11] Asymmetric halftone technique applied on both sides of the line

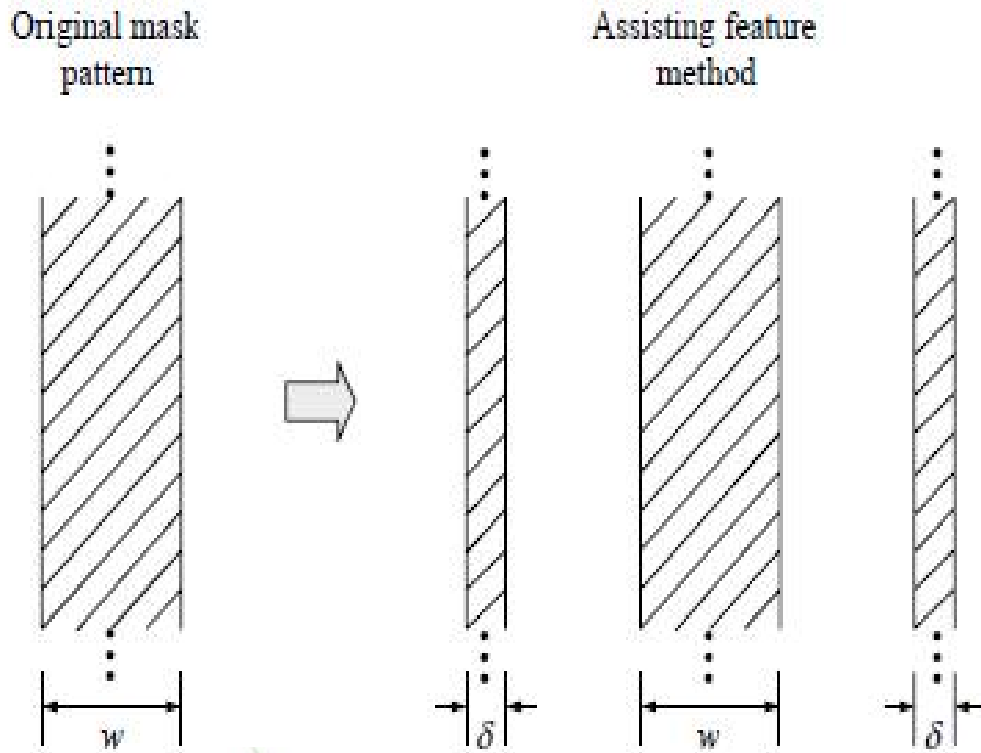
게다가 선폭 변동에 대한 해상도는 라인의 양면에 주기적으로 적용된 블록들을 비대칭 구조로 적용해도 향상시킬 수 있다. 이를 비대칭 하프톤 기술이라고 하고 그림 11에 나타냈다. 이 그림에서는 세그먼트의 두 가지 세트는 각각  $n_r\delta$ 과  $n_l\delta$ 의 다른 주기를 적용한다. 좌측에서 세그먼트의 높이는  $\delta$ 이고 폭은  $m_l\delta$ 이다. 우측에서 세그먼트의 높이는  $\delta$ 이고 폭은  $m_r\delta$ 이다. 라인의 모서리에 그려진 추가된 두께는 다음과 같다. [1]

$$\delta_{add} = \frac{(m_l n_r + m_r n_l)}{[n_l, n_r]}, \quad (5.3)$$

여기에서  $[n_r, n_l]$ 는  $n_r, n_l$ 의 최소 공배수를 의미한다.

## 2) Assisting Feature

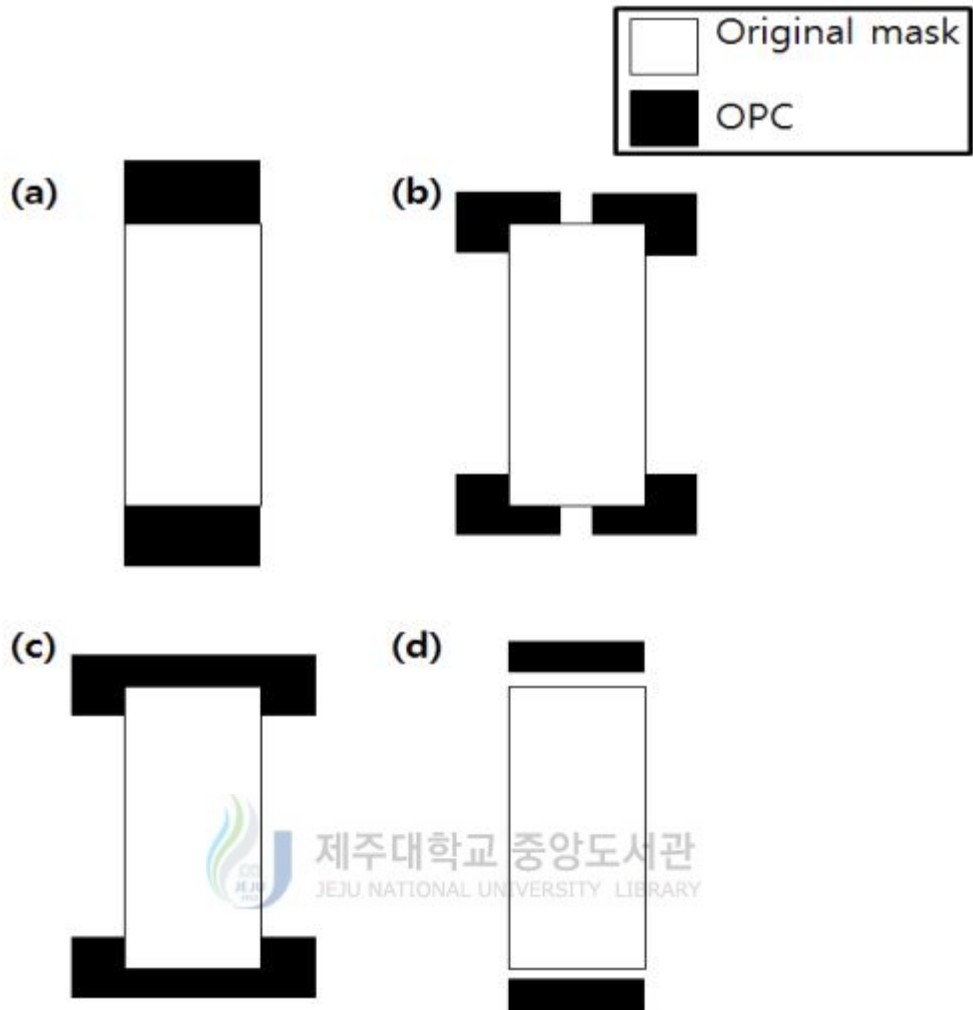
Line biasing 방법을 구현하는 것은 간단하지만 전체 이미지 품질을 개선하지 못한다. 일반적으로 off-axis 조명은 밀집된 패턴의 이미지 품질과 저밀도 이미지 품질을 개선시키는데 이용된다. 그리고 그림 12에 나타난 어시스트 피쳐 방법 또한 이미지 품질과 저밀도 이미지 품질을 향상시킬 수 있다. 그림 12에서 original mask pattern은 보정하기 이전의 라인 패턴의 마스크를 나타내며 assisting feature method는 어시스팅 피쳐 방법을 나타낸다. 이 방법은 라인의 양측에 인쇄되지 않는 부분에 작은 어시스팅 피쳐를 추가하는 것이다. 이러한 어시스팅 피쳐는 off-axis 조명에 의하여 개선되며 이미지의 질을 향상시키는 일정하고 조밀한 환경을 만든다. 따라서 어시스트 피쳐 방법은 동시에 선폭을 조정하고 이미지 품질 향상을 위하여 사용된다. 그러나 어시스팅 피쳐는 구현하기 어려운 단점을 가지고 있다. 효과적으로 이미지 왜곡을 보정하기 위해서는 어시스팅 피쳐의 위치, 크기, 개수 등 몇 가지 변수를 고려해야 한다.



[Fig. 12] Assisting feature method applied on both sides of the line

### 3) Line-Shortening Reduction OPC

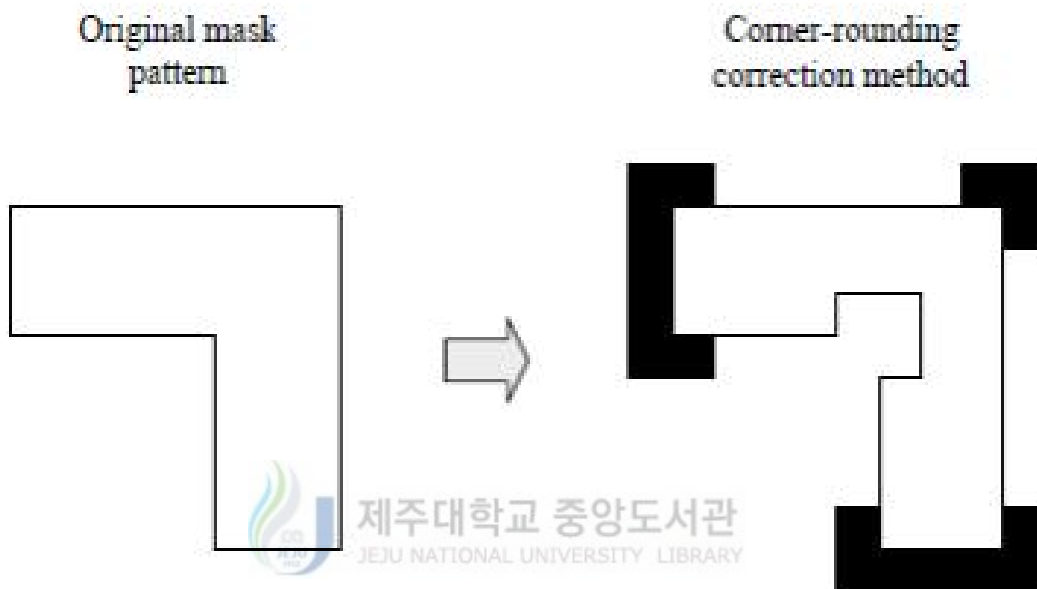
라인 쇼트닝 현상은 광 리소그래피에서 매우 일반적이다. 이 현상을 줄일 수 있는 간단하고 효과적인 방법은 그림 13. (a)와 같이 라인의 길이를 연장시키는 것이다. 그림 13은 흰 블록을 마스크 패턴의 원형을 나타낸다. 그리고 검은 블록은 OPC의 조정된 마스크를 나타낸다. 그러나 고밀도 패턴 환경에서 라인 연장을 위한 공간이 충분히 없다. 따라서 이 문제를 해결하기 위하여 serif, hammer가 라인의 끝을 나타내기 위하여 사용되는 방법이다. 이러한 두 방법은 그림 13에서 각각 b와 c, 그리고 추가로 분리된 어시스팅 피처를 설계하는 방법을 나타냈다. [3]



[Fig. 13] Line-shortening reduction OPC  
 (a) lengthening (b) Serif  
 (c) Hammer (d) Separated assisting feature

#### 4) Two-Dimensional OPC

이차원 OPC의 목적은 코너 라운딩을 수정하는 것이다. 이를 해결하기 위하여 널리 이용되는 방법은 그림 13에서 나타낸 serif와 hammer를 모두 활용하는 것이다. 그림 14의 original mask pattern은 원래 마스크 패턴을 나타내고 corner-rounding correction method는 코너 라운딩 보정 방법을 나타낸 것이다.

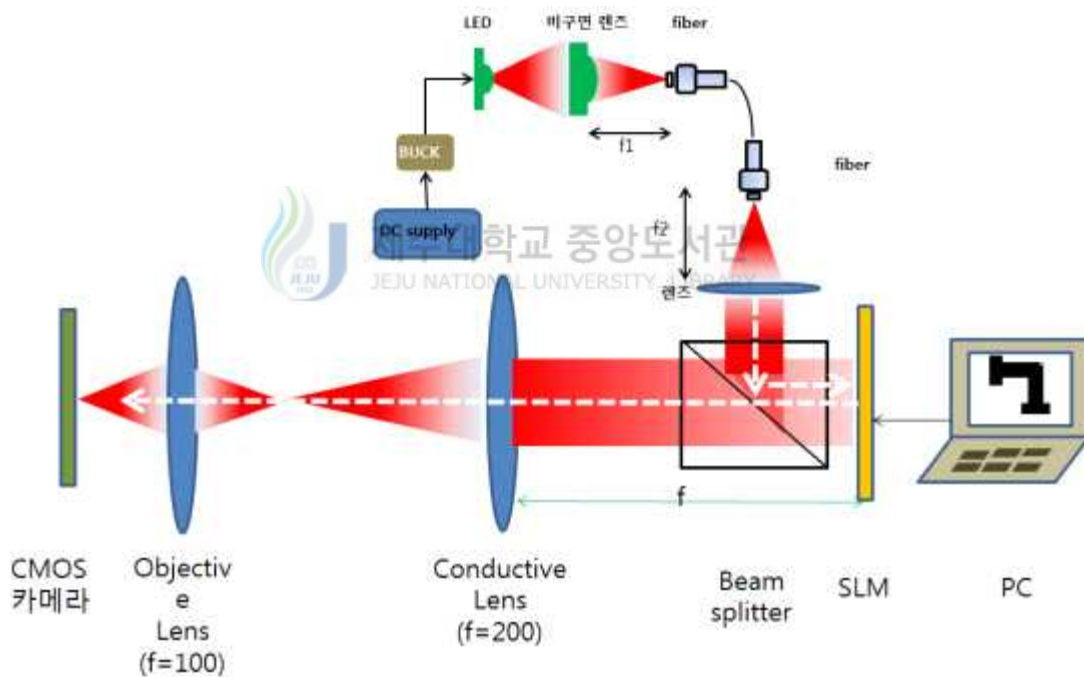


[Fig. 14] Two-dimensional OPC used to correct the corner rounding

### III. 실험 장치 및 방법

#### 1. 실험 장치

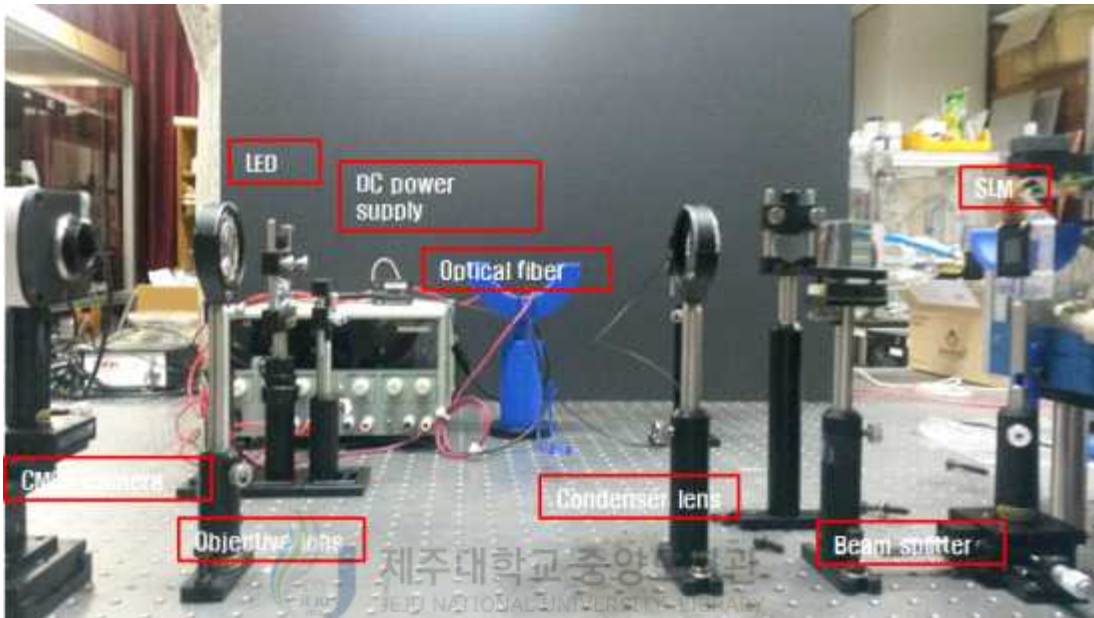
실험 장치는 그림16과 같다. 광원으로는 LED(650 nm, 3W)를 사용하였다. LED의 전원장치로는 EZ digital사의 GP4303 TP(DC:0~60 V, 0~5 A)모형을 사용하였으며 안정적인 전원 공급을 위하여 LED와 전원장치사이에 안정기 (BUCK) 를 설치하였다. SLM에 입사되는 빛을 평행광으로 만들기 위해 fiber와 lens를 이용했다.



[Fig. 15] Experimental setup schematic

평행으로 투과하는 광은 beam splitter를 통하여 수직으로 SLM으로 전송되어 컴퓨터를 이용하여 설계된 이미지가 반사된다. 반사된 광은 집광 렌즈( $f=200$  mm,  $D=50$  mm)와 대물렌즈( $f=100$  mm,  $D=50$  mm)를 투과하여 CMOS카메라에서 이미지가 형성되도록 하였다. 실험에 사용된 SLM은 삼성의 Samsung

SyncMaster 180T(D)/800D TFT(D)/MagicSyncMaster L18D(D)모형을 사용했다. 이 모형을 해상도 1280 x 1024 pixel이고 픽셀크기는 폭 15.625  $\mu\text{m}$ , 높이 14.46844  $\mu\text{m}$ 이다. CMOS카메라는 Lumenera사의 Infinity1-1M 모형을 사용하였다. 이 모형을 1280 x 1024 pixel 해상도, 픽셀 크기는 5.2 x 5.2  $\mu\text{m}$ 이다.



[Fig. 16] The experimental setup

이미지를 형성하기 위해 구축한 시스템은 4f 시스템이다. 이 시스템은 표2와 같은 특성을 갖는다. 실험에 사용된 이미지는 표3과 표4의 조건으로 이미지를 설계했다. 표3에 나타낸 line and space pattern에서 뒤에 Line(10 400 40)는 수평형 이미지에서 (높이 폭 피치)를 의미한다. space(5 20, 20 5)는 각각 space 패턴의 크기를 나타내며 (수평형 이미지에 사용된 문양의 높이와 폭, 수직이미지에서 사용된 space 이미지의 높이와 폭)으로 표현했다.



<Table 2> Characteristics of experimental setup

unit: pixel( $\mu\text{m}$ )

system	characteristic	value
light Source	wavelength	0.65 $\mu\text{m}$
optical system	focal length of system	66.7 mm
	F-number	1.33
	critical dimension	0.86 $\mu\text{m}$
	magnification	0.5
	coherent factor( $\sigma$ )	0.01

<Table 3> Condition of '┐' pattern and space pattern

unit: pixel( $\mu\text{m}$ )

Type	Width	Height
'┐' pattern	20 (312.5)	10 (146.4844)
	40 (625)	20 (292.9688)
	60 (937.5)	30 (439.4532)
space pattern	5 (78.125)	20 (292.9688)
	20 (312.5)	5 (73.2422)
space pattern	2 (31.25)	20 (292.9688)
	20 312.50	2 (29.29688)

<Table 4> Condition of line and space pattern

unit: pixel(μm)

Name(H,W,P)	Type	Pitch(P)	Height(H)	Width(W)
line pattern	Horizontal	40 (585.9376)	20 (312.5)	400 (5600)
	Vertical	40 (560)	400 (5859.376)	20 (292.9688)
line and space pattern	Horizontal	40 (585.9376)	15 (234.375)	400 (5600)
	Vertical	40 (560)	400 (5859.376)	15 (219.7266)
line and space pattern	Horizontal	40 (585.9376)	10 (156.25)	400 (5600)
	Vertical	40 (560)	400 (5859.376)	10 (146.4844)
line and space pattern	Horizontal	20 (280)	15 (234.375)	400 (5600)
	Vertical	20 (292.9688)	400 (5859.376)	15 (219.7266)
line and space pattern	Horizontal	20(280)	10(156.25)	400 (5600)
	Vertical	20 (292.9688)	400 (5859.376)	10 (146.4844)
line and space pattern	Horizontal	20 (280)	5 (78.125)	400 (5600)
	Vertical	20 (292.9688)	400 (5859.376)	5 (73.2422)

## 2. 실험 방법

### 2.1 해상도 확인 실험

- 1) 전원공급 장치를 이용하여 광원에 일정한 전압(5.3 V, 0.27 A)을 공급했다.
- 2) 포토샵 프로그램으로 설계한 line and space 이미지를 SLM에 입력했다.
- 3) 이미지를 센터에 위치시키고 카메라에 투영된 이미지를 노트북을 이용하여 확인했다.
- 4) 카메라에 의해 출력된 이미지와 입력한 이미지를 Matlab 프로그램을 이용하여 비교했다.

### 2.2 Optical Proximity Correction에 의한 이미지 보정실험

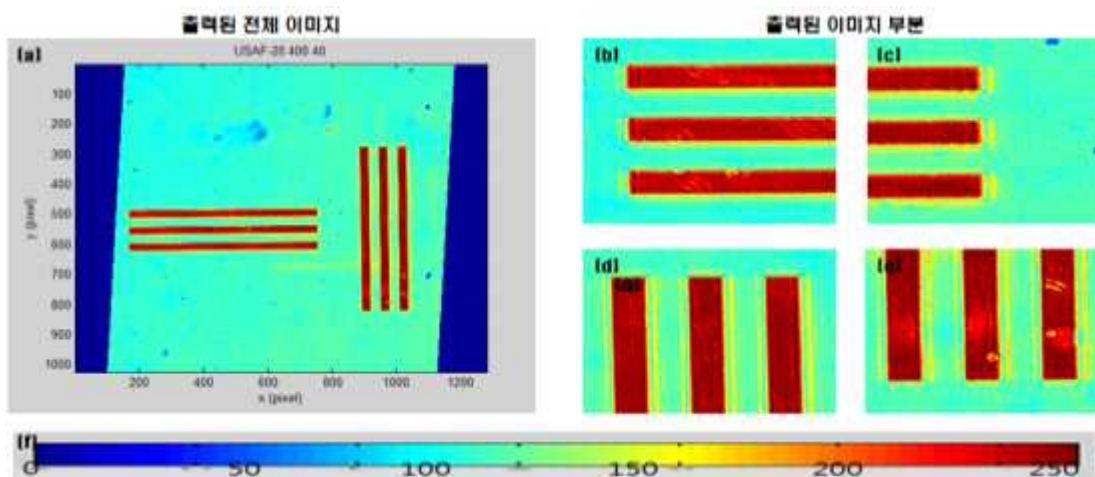
- 1) 광원의 출력을 고정하기 위하여 일정한 전압(5.3 V, 0.27 A)을 공급했다.
- 2) 해상도 확인실험에서 왜곡된 이미지와 'ㄱ' pattern, line and space pattern을 각각 SLM에 입력했다.
- 3-1) 일반적인 OPC: 왜곡된 이미지부분에 1 pixel 단위로 이미지에 변화를 주어 실시간으로 보정했다.
- 3-2) 회색조 OPC: 왜곡된 이미지부분에 1 pixel 단위로 이미지를 보정 픽셀의 intensity를 낮게 설정하여 실시간으로 보정했다.  
(왜곡이 발생한 모서리부분과 모서리를 이루는 변을 회색조로 명도를 낮추어 설계했다.)
- 4) 보정된 입력 이미지와 보정 전 입력 이미지를 Matlab을 이용하여 intensity 분포 및 왜곡부분을 분석했다.

## IV. 실험결과 및 고찰

### 1. Resolution 확인 결과

#### 1) Line(20, 400, 40)

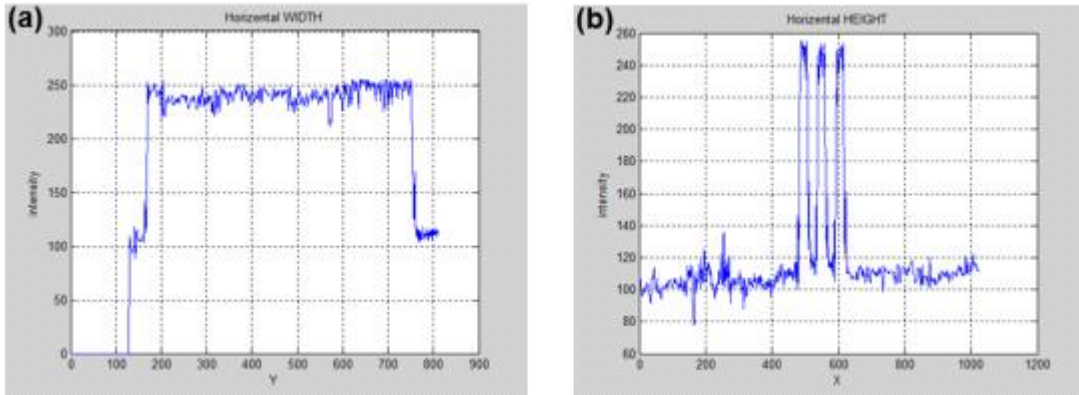
Line-(20, 400, 40) 이미지는 카메라의 노광시간을 31 ms, 카메라의 Gain이 1일 때 촬영했다. 그림 17에서 (a)는 설계한 디자인을 출력한 전체 이미지이다. 그리고 (b)와 (c)는 각각 수평 이미지의 양 끝을 나타내며, (d)와 (e)는 수직 이미지의 상·하단 이미지이다. 그림 17에서 (f)는 intensity color bar이다. 그림 17에서 표현된 바와 같이 intensity가 고르게 분포되어있다. 이는 수평 이미지의 intensity 분포를 나타낸 그림 18과 수직이미지의 intensity 분포를 나타낸 그림 19에서도 확연하게 나타나며 전체적으로 선명하게 이미지가 출력되었다. 출력된 이미지의 길이는 수평 이미지에서 폭 582 pixel로 3026.5  $\mu\text{m}$ , 폭 156  $\mu\text{m}$ 로 각각 0.48 배, 0.53 배 축소되어 출력되었다. 수직이미지의 경우, 폭 32 pixel로 166.4  $\mu\text{m}$ , 높이 551 pixel로 28,65.2  $\mu\text{m}$ 로 각각 0.53 배, 0.49 배로 출력되었다.



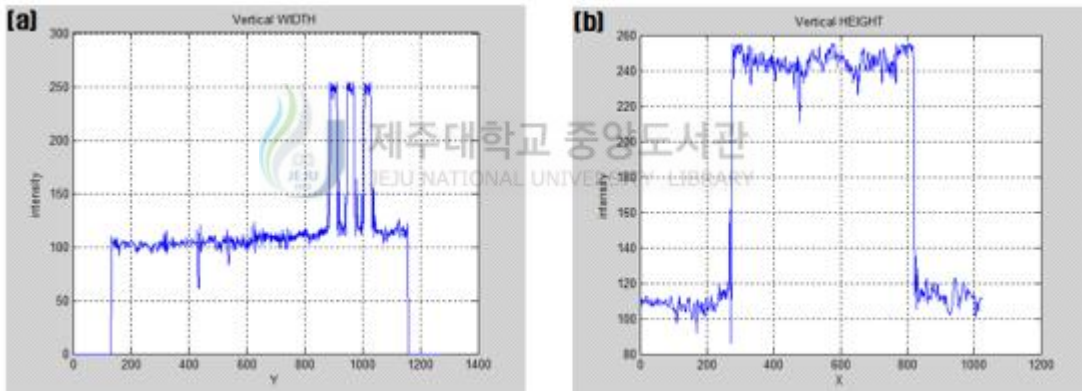
[Fig. 17] Line(20, 400, 40) intensity distribution

power: 5.3 V, 0.27 A, Exposure time: 31 msec, Gain: 1,

(a) printed an entire image, (b) RHS of horizontal image, (c) LHS of horizontal image, (d) Top of vertical image, (e) Bottom of vertical image, (f) Intensity color bar



[Fig. 18] Dimension measurement of horizontal part in Line(20, 400, 40)  
width: 3026.4  $\mu\text{m}$ (0.48 x), height: 156  $\mu\text{m}$ (0.53 x)  
(a) Analysis of width of the horizontal image,  
(b) Analysis of height of the horizontal image

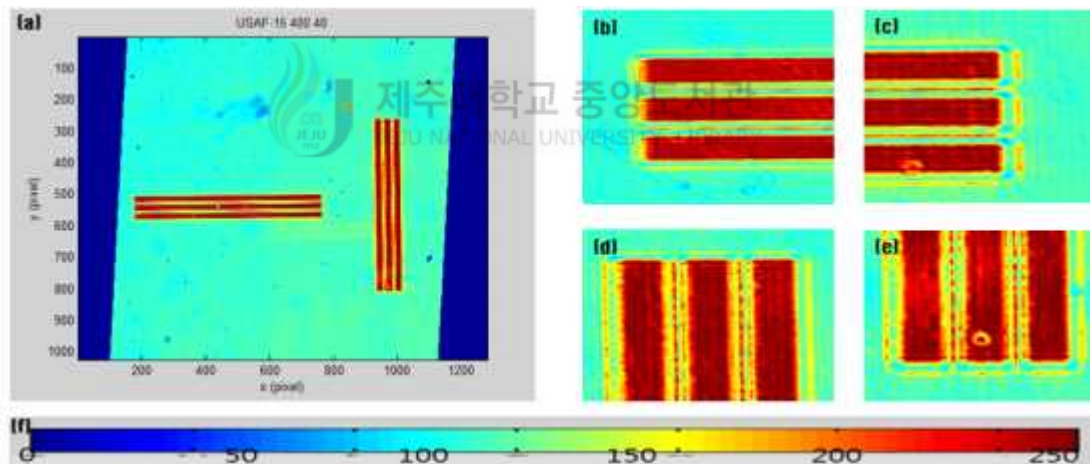


[Fig. 19] Dimension measurement of vertical part in Line(20, 400, 40),  
width: 166.4  $\mu\text{m}$ (0.53 x), height: 2865.2  $\mu\text{m}$ (0.49 x)  
(a) Analysis of width of the vertical image,  
(b) Analysis of height of the vertical image

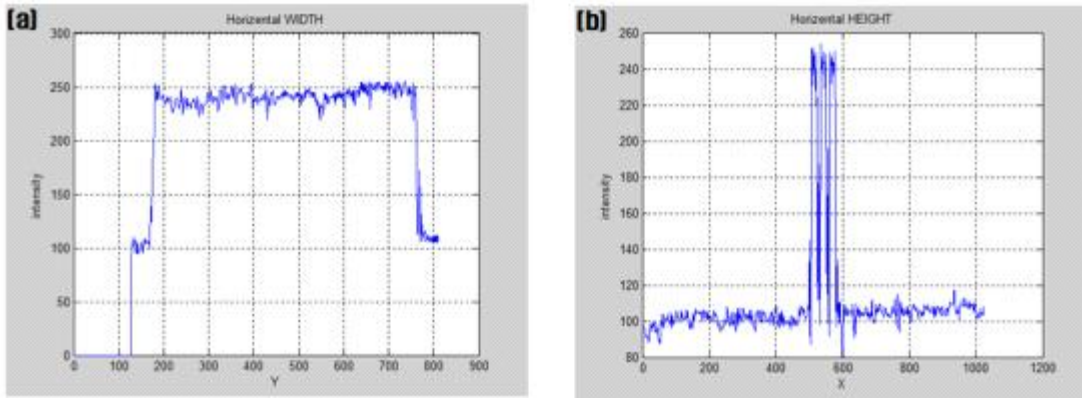
2) Line-(15, 400, 40)

Line-(15, 400, 40) 이미지는 노광시간을 31 ms, 카메라의 Gain을 1일 때 촬영을 했다.

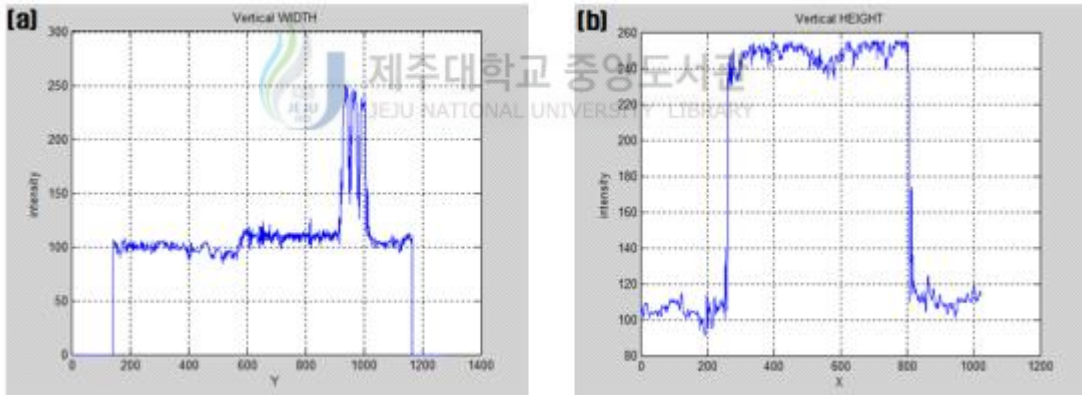
그림 20에서 표현된 바와 같이 intensity가 고르게 분포되어있다. 이는 그림 21과 그림 22에서도 확연하게 나타나며 전체적으로 선명하게 이미지가 출력되었다. 그러나 그림 21(b)에서 distortion이 보였다. 시스템의 축이 미세하게 일치하지 않았다는 결과로 판단했다. 그리고 (c), (d), (e)에서 변에서 이미지가 부정확하게 나타났다. 이 부정확성으로 보아 이미지 보정이 필요하다고 판단했다. 출력된 이미지의 길이는 수평 이미지에서 폭 596 pixel로 3099.2  $\mu\text{m}$ , 폭은 23 pixel로 119.6  $\mu\text{m}$ 로 각각 0.5 배, 0.54 배 축소되어 출력되었다. 수직이미지의 경우, 폭 25 pixel로 130  $\mu\text{m}$ , 높이 551 pixel로 28,65.2  $\mu\text{m}$ 로 각각 0.55 배, 0.49 배로 출력되었다.



[Fig. 20] Line(15, 400, 40) intensity distribution  
power: 5.3 V, 0.27 A, Exposure time: 31 msec, Gain: 1,  
(a) printed an entire image, (b) RHS of horizontal image,  
(c) LHS of horizontal image, (d) Top of vertical image,  
(e) Bottom of vertical image, (f) Intensity color bar



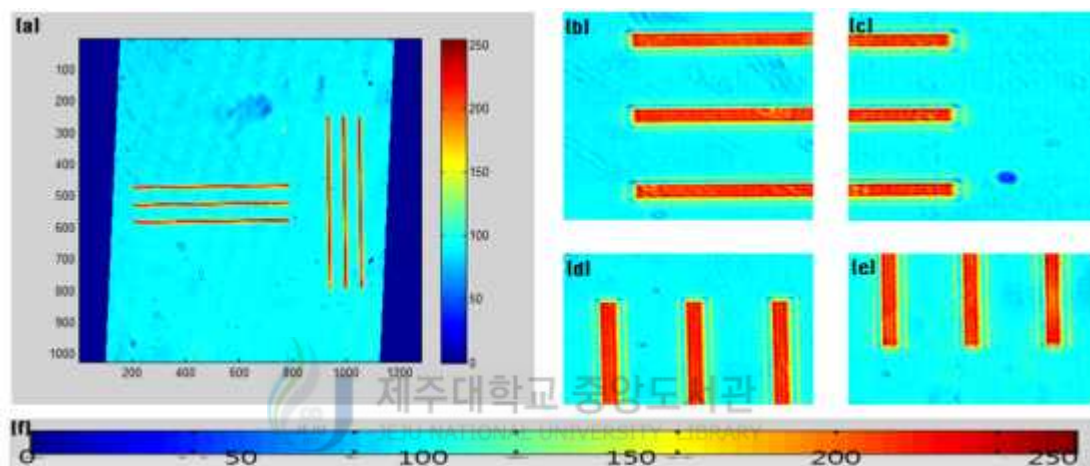
[Fig. 21] Dimension measurement of horizontal part in Line(15, 400, 40)  
width: 3099.2  $\mu\text{m}$ (0.5 x), height: 119.6  $\mu\text{m}$ (0.54 x)  
(a) Analysis of width of the horizontal image,  
(b) Analysis of height of the horizontal image



[Fig. 22] Dimension measurement of vertical part in Line(15, 400, 40),  
width: 130  $\mu\text{m}$ (0.55 x), height: 2865.2  $\mu\text{m}$ (0.49 x)  
(a) Analysis of width of the vertical image,  
(b) Analysis of height of the vertical image

### 3) Line(10,400,40)

Line(10, 400, 40) 이미지는 노광시간을 31 ms, 카메라 Gain을 1일 때 촬영을 했다. 앞서 도시된 line(15, 400,40)과 마찬가지로 모서리 부분에 이미지 부정확성이 발생했다. 출력된 이미지의 길이는 수평 이미지에서 폭 593 pixel로 3083.6  $\mu$ m, 폭은 16 pixel로 83.2  $\mu$ m로 각각 0.49 배, 0.57 배 축소되어 출력되었다. 수직 이미지의 경우, 폭 18 pixel로 93.6  $\mu$ m, 높이 551 pixel로 28,65.2  $\mu$ m로 각각 0.59 배, 0.49 배로 출력되었다.

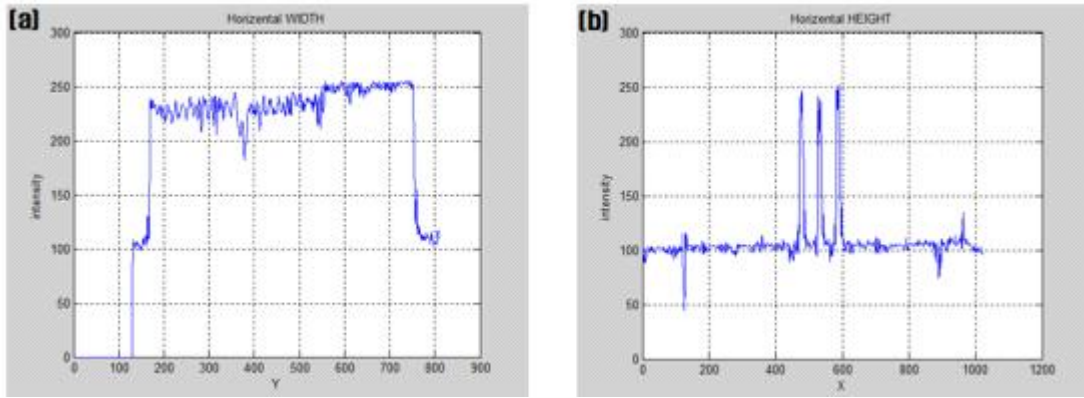


[Fig. 23] Line(10, 400, 40) intensity distribution

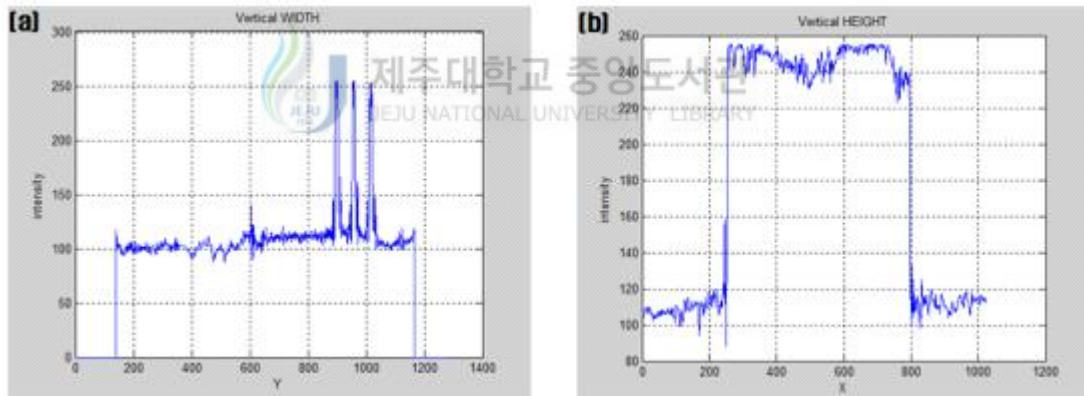
Power: 5.3 V 0.27 A, Exposure time: 31 ms, Gain: 1,

- (a) printed an entire image, (b) RHS of horizontal image,
- (c) LHS of horizontal image, (d) Top of vertical image,
- (e) Bottom of vertical image, (f) Intensity color bar





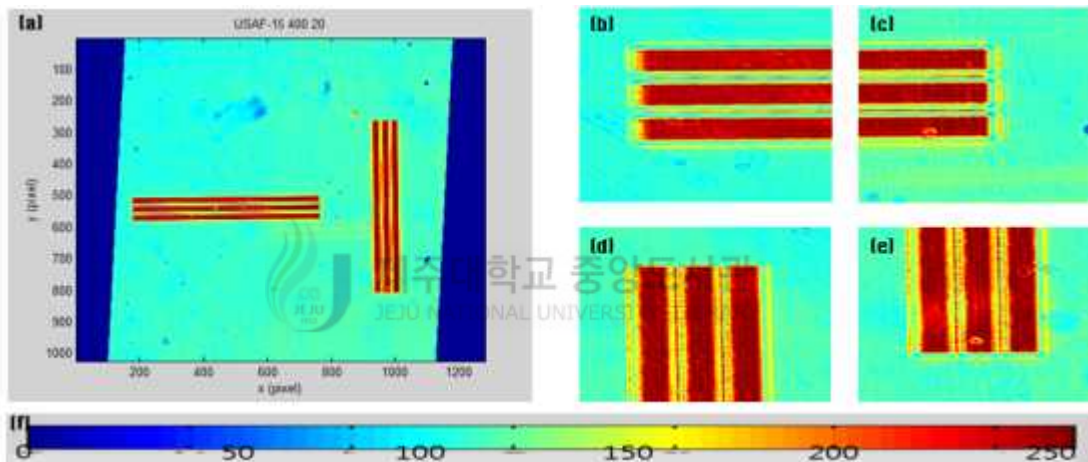
[Fig. 24] Dimension measurement of horizontal part in Line(10, 400, 40)  
width: 3073.2  $\mu\text{m}$ (0.49 x), height: 83.2  $\mu\text{m}$ (0.57 x)  
(a) Analysis of width of the horizontal image,  
(b) Analysis of height of the horizontal image



[Fig. 25] Dimension measurement of vertical part in Line(10, 400, 40)  
width: 93.6  $\mu\text{m}$ (0.6 x), height: 2865.2  $\mu\text{m}$ (0.49 x)  
(a) Analysis of width of the vertical image,  
(b) Analysis of height of the vertical image

4) Line(15,400,20)

그림 26의 이미지는 노광시간 31 msec, 카메라의 Gain 1의 조건에서 촬영되었다. 수평 이미지에서의 폭과 높이는 각각 3114.8  $\mu\text{m}$ , 114.4  $\mu\text{m}$ 로 0.5 배, 0.52배 축소되어 출력되었음을 그림 27를 통하여 확인했으며, 그림28은 수직이미지의 폭, 높이를 측정한 결과이다. 그 값이 각각 140.4  $\mu\text{m}$ , 2891.2  $\mu\text{m}$ 로 0.6 배, 0.5 배 축소되었음을 확인했다. 그림 27에서 표현된 바와 같이 다른 부분에서는 이미지 왜곡이 없으나 (a), (d), (e) 부분에서 왜곡이 발생했다. 그래서 (a)부분을 센터에 놓고 이미지를 확인하니 왜곡이 나타나지 않은 것으로 보아 이는 실험 전 광 시스템을 이루는 장치의 위치가 미세하게 변경되어 발생한 것으로 사료된다.



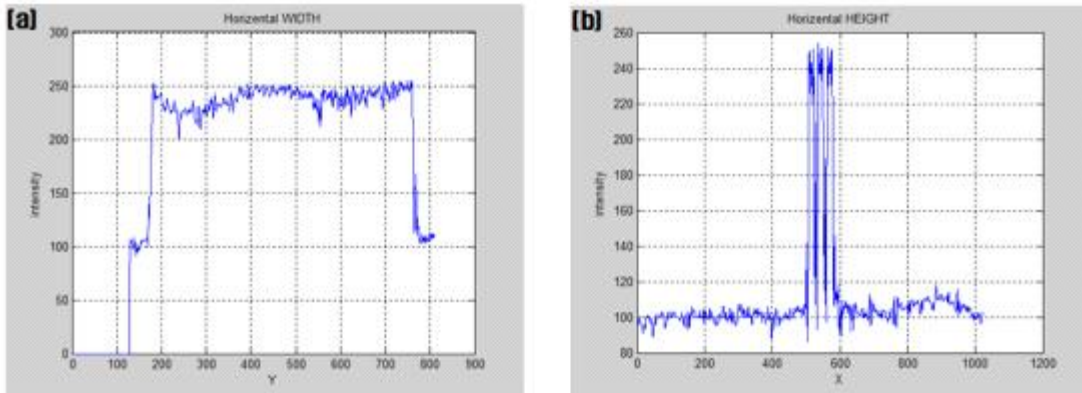
[Fig. 26] Line(15, 400, 20) intensity distribution

Power: 5.3 V .027 A, Exposure time: 31 ms, Gain: 1,

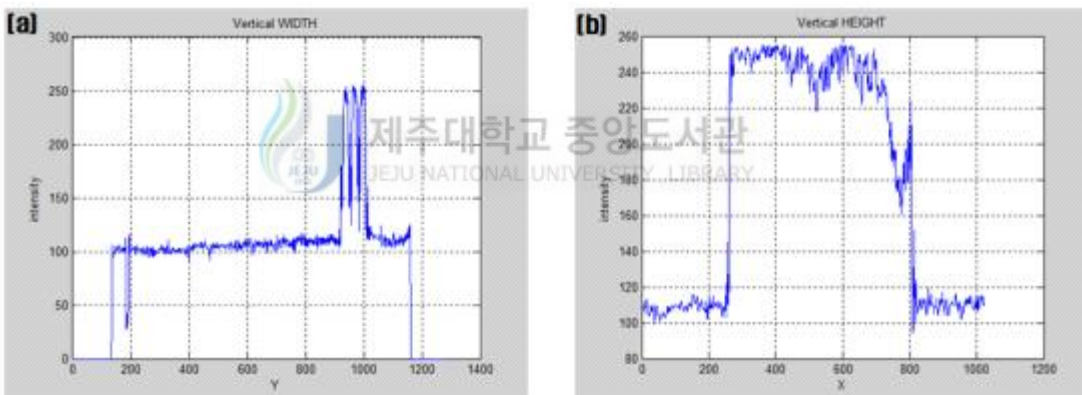
(a) printed an entire image, (b) RHS of horizontal image,

(c) LHS of horizontal image, (d) Top of vertical image,

(e) Bottom of vertical image, (f) Intensity color bar



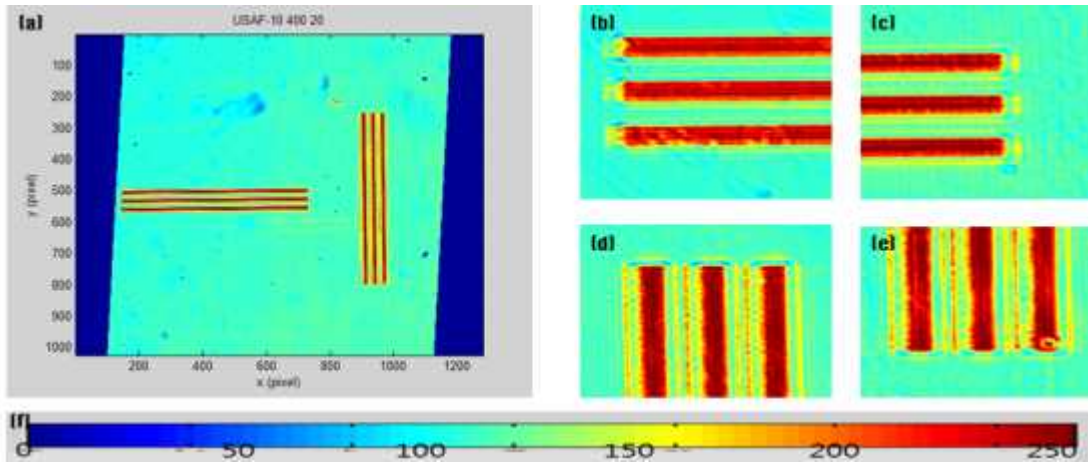
[Fig. 27] Dimension measurement of horizontal part in Line(15, 400, 20)  
width: 3114.8  $\mu\text{m}$ (0.5 x), height: 114.4  $\mu\text{m}$ (0.52 x)  
(a) Analysis of width of the horizontal image,  
(b) Analysis of height of the horizontal image



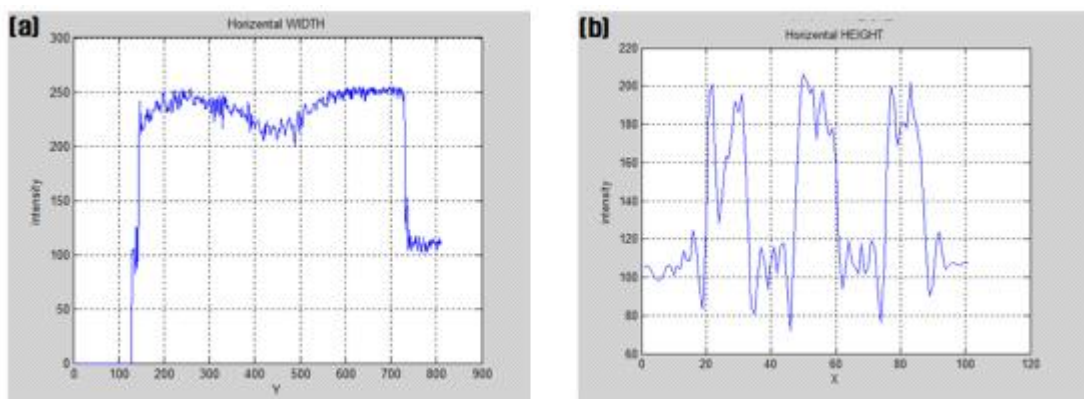
[Fig. 28] Dimension measurement of vertical part in Line(15, 400, 20)  
width: 140.4  $\mu\text{m}$ (0.6 x), height: 2891.2  $\mu\text{m}$ (0.49 x),  
(a) Analysis of width of the vertical image,  
(b) Analysis of height of the vertical image

5) Line(10,400,20)

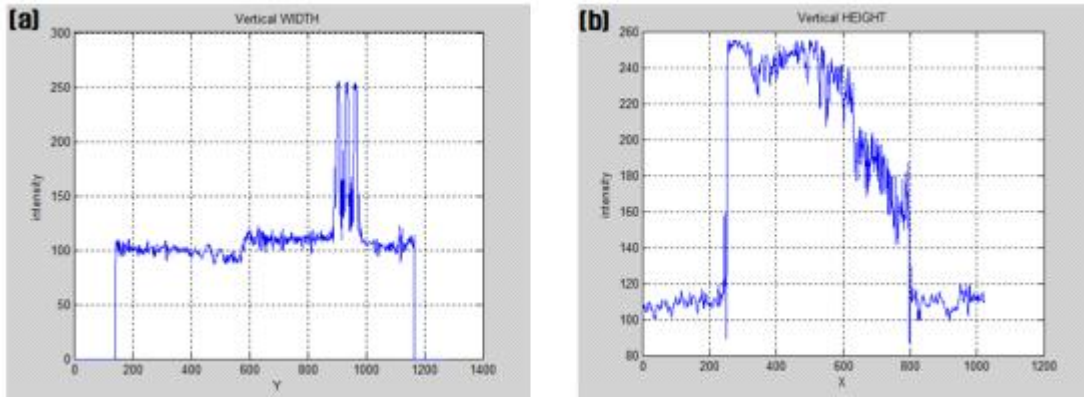
그림 29의 (b)와 (c)에 나타났듯이 수평 이미지 부분에서 이미지가 부정확하게 출력되었다. 이미지는 크기는 수평이미지에서 폭 3114.8  $\mu\text{m}$ 로 0.5 배 축소, 높이 83.2  $\mu\text{m}$ 로 0.57 배 축소로 측정되었다. 수직이미지에서는 폭 88.4  $\mu\text{m}$ 로 0.57 배, 높이 2860  $\mu\text{m}$  0.49 배 축소로 측정되었다.



[Fig. 29] Line(5, 400, 20) intensity distribution  
 Power: 5.3 V 0.32 A, Exposure time: 31 ms, Gain: 1,  
 (a) printed an entire image, (b) RHS of horizontal image,  
 (c) LHS of horizontal image, (d) Top of vertical image,  
 (e) Bottom of vertical image, (f) Intensity color bar



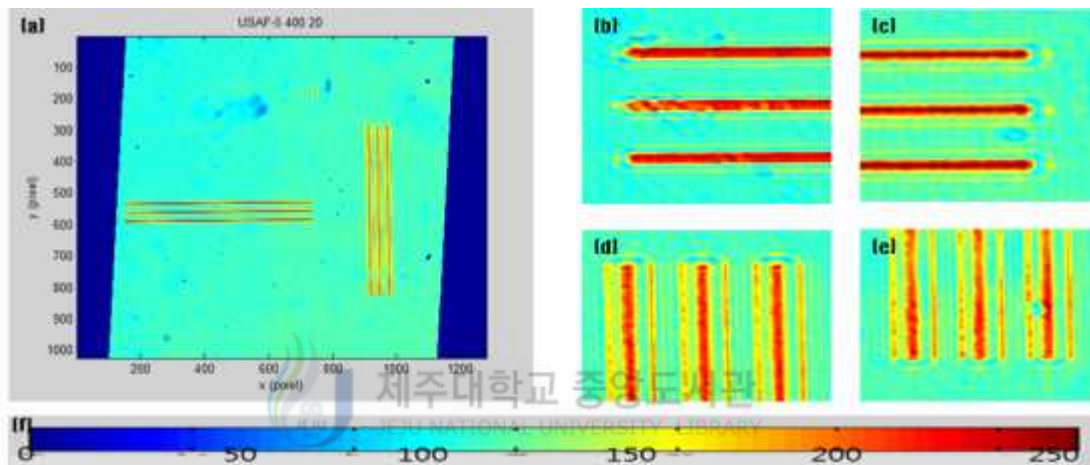
[Fig. 30] Dimension measurement of horizontal part in Line(10, 400, 20)  
 width: 3078.4  $\mu\text{m}$ (0.5 x), height: 83.2  $\mu\text{m}$ (0.57 x)  
 (a) Analysis of width of the horizontal image,  
 (b) Analysis of height of the horizontal image



[Fig. 31] Dimension measurement of vertical part in Line(10, 400, 20)  
 width: 88.4  $\mu\text{m}$ (0.56 x), height: 2860  $\mu\text{m}$ (0.49 x)  
 (a) Analysis of width of the vertical image,  
 (b) Analysis of height of the vertical image

6) Line(5, 400, 20)

그림 32에서 (a),(b)에서 모서리에서 왜곡현상이 발생했다. 이는 그림 33와 그림 34에서 쉽게 확인할 수 있었다. 이 이미지는 수평에서 폭, 높이 각각 3078.4  $\mu\text{m}$  로 0.49 배, 41.6  $\mu\text{m}$ 로 0.28 배 축소되었다. 반면에 수직이미지에서는 폭 52  $\mu\text{m}$ , 높이 2865.2  $\mu\text{m}$ 로 각각 0.67 배, 0.49 배로 측정되었으며 이미지 왜곡이 수평보다 적게 나타났으나 중간 부분의 intensity 분포로 보아 시스템들의 축이 일치되지 않아 발생한 것으로 사료된다.



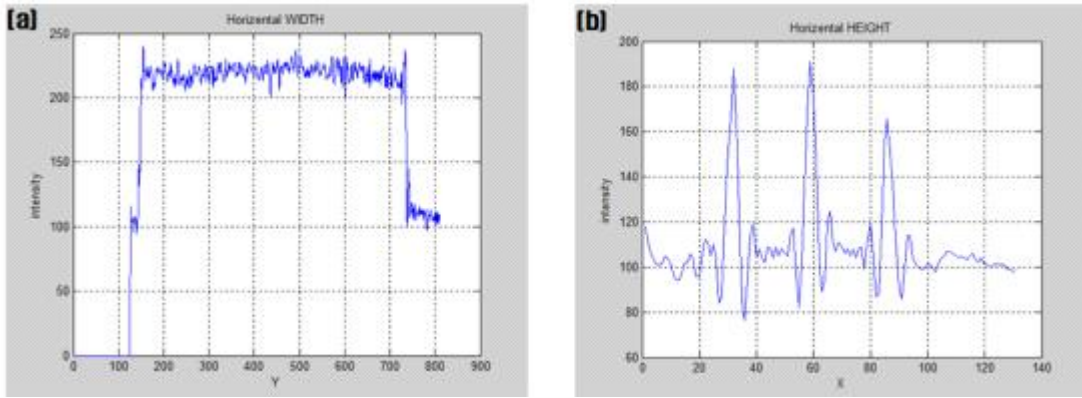
[Fig. 32] Line(5, 400, 20) intensity distribution

Power: 5.3 V 0.27 A, Exposure time: 31 ms, Gain: 1,

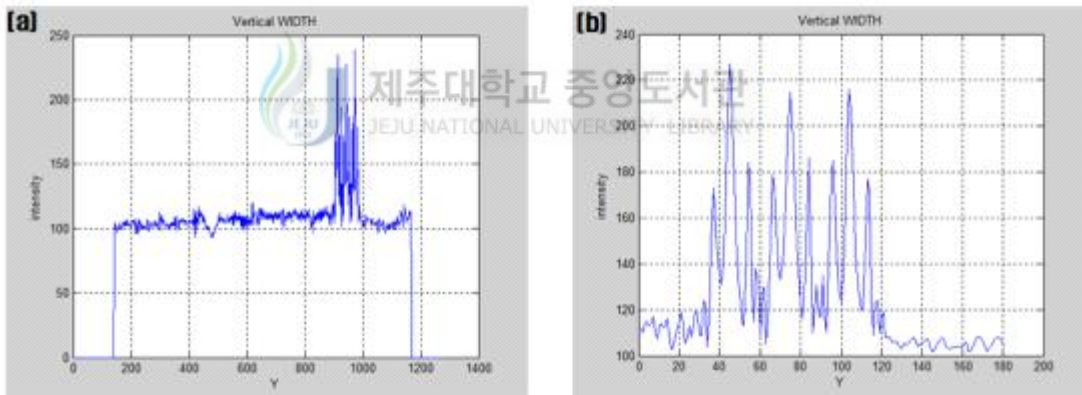
(a) printed an entire image, (b) RHS of horizontal image,

(c) LHS of horizontal image, (d) Top of vertical image,

(e) Bottom of vertical image, (f) Intensity color bar



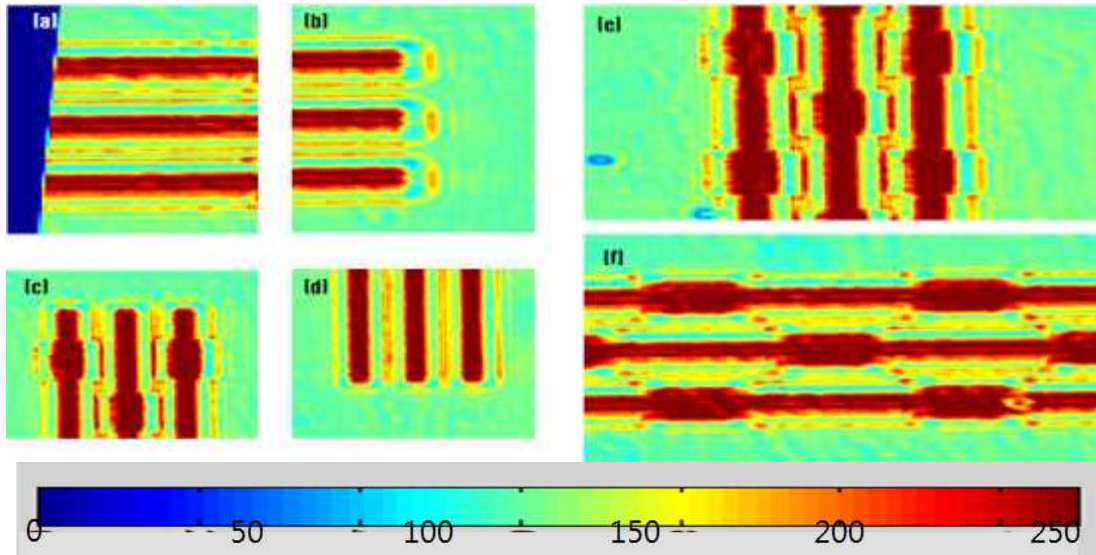
[Fig. 33] Dimension measurement of horizontal part in Line(5, 400, 20)  
 width: 3078.4  $\mu\text{m}$ (0.49 x), height: 41.6  $\mu\text{m}$ (0.28 x),  
 (a) Analysis of width of the horizontal image,  
 (b) Analysis of height of the horizontal image



[Fig. 34] Dimension measurement of vertical part in Line(5, 400, 20)  
 width: 52  $\mu\text{m}$ (0.67 x), height: 2865.2  $\mu\text{m}$ (0.49 x),  
 (a) Analysis of width of the vertical image,  
 (b) Analysis of height of the vertical image

7) Line(10, 400, 20) and space(2 20, 20 2) pattern

그림 36은 Line(10, 400, 20)을 바탕으로 line and space를 설계한 문양을 출력한 것으로 전반적으로 이미지 왜곡과 부정확성이 발생했다.

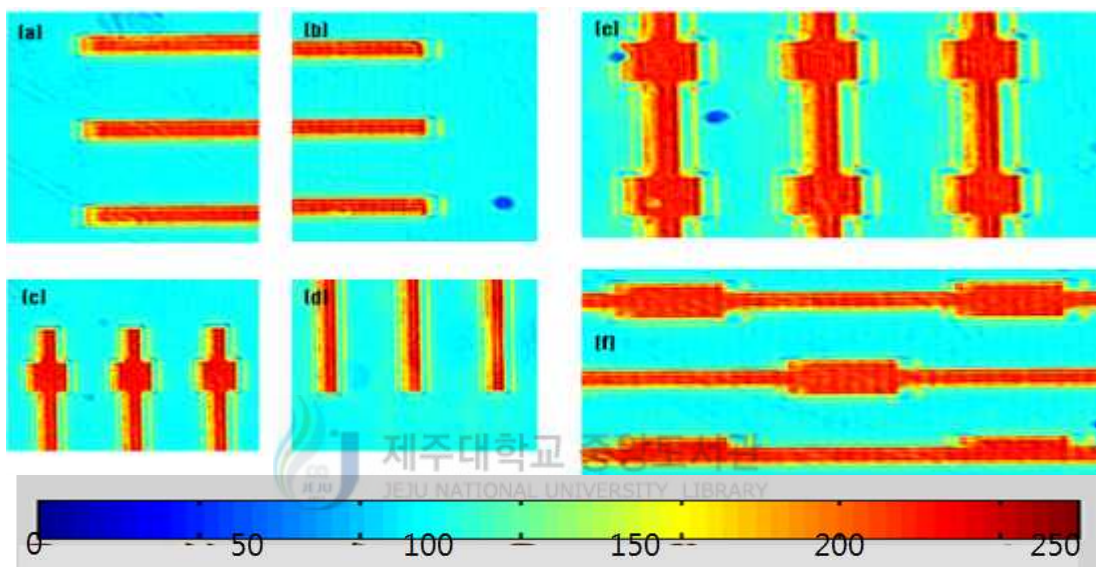


[Fig. 35] Line(10, 400, 20) and space(2 20, 20 2) pattern intensity distribution  
Power: 5.3 V, 0.27 A, Exposure time: 14 msec, Gain: 1.75,  
(a) printed an entire image, (b) RHS of horizontal image,  
(c) LHS of horizontal image, (d) Top of vertical image,  
(e) Bottom of vertical image, (f) Intensity color bar



8) Line(10, 400, 40) and space(5 20, 20 5) pattern

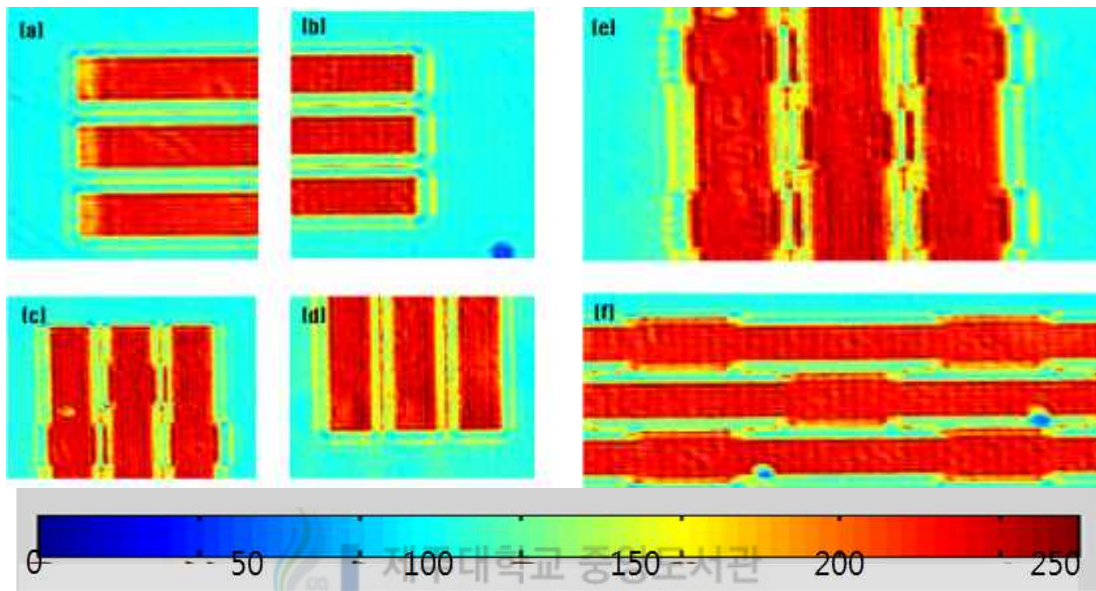
line and space pattern(5 20, 20 5)는 Line(10, 400, 40)을 기반으로 line and space의 크기를 각각 폭 5, 20 pixel, 높이 20, 5 pixel을 추가하여 설계한 이미지로 그림 36에서 보이 듯 이미지 전반 적으로 좌측에 왜곡현상이 발생했다. 이는 광 시스템의 축을 일치하지 않아 발생한 것으로 사료된다. 그리고 해상도와 관련된 이미지 부정확성은 이미지 수평 이미지 (a)와 (b)부분에서 발견되었다.



[Fig. 36] Line(10, 400,40) and space(5 20, 20 5) pattern intensity distribution,  
 Power: 5.3 V, 0.27 A, Exposure time: 14 msec, Gain: 1.75,  
 (a) printed an entire image, (b) RHS of horizontal image,  
 (c) LHS of horizontal image, (d) Top of vertical image,  
 (e) Bottom of vertical image, (f) Intensity color bar

9) Line(15, 400, 20) and space(2 20, 20 2) pattern

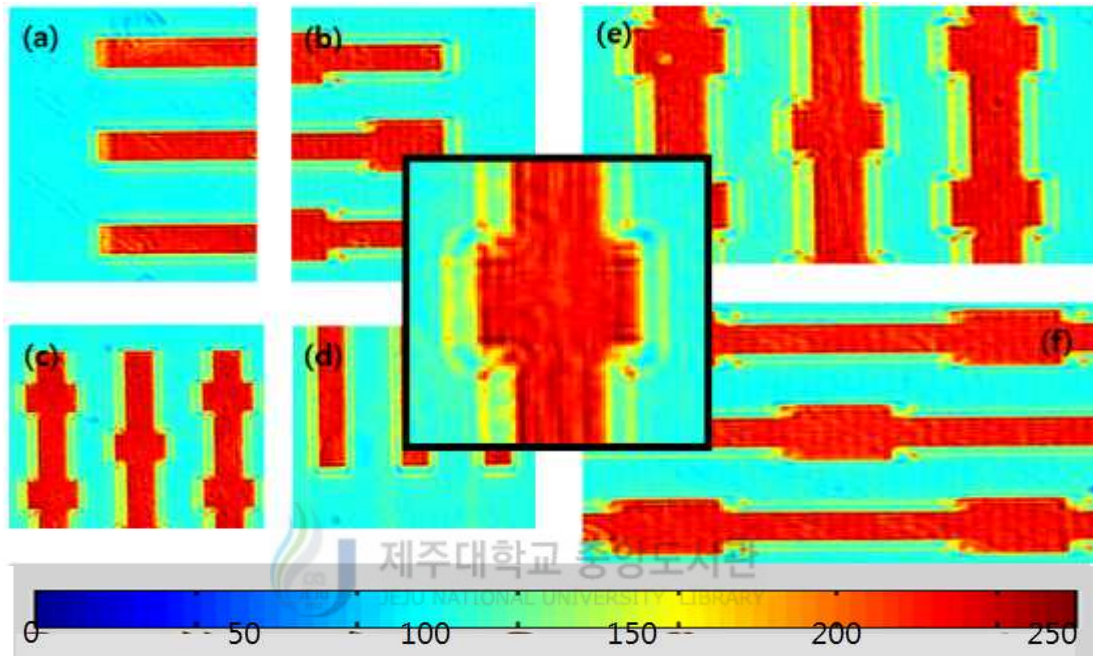
이 패턴은 Line(15, 400, 20)을 기초로 하여 설계했다. 그림 37에서는 전체적으로 좌측에서 이미지의 왜곡이 발생하였으며 line and space pattern의 모서리에 서 이미지변형을 쉽게 확인했다.



[Fig. 37] Line(15, 400, 20) and space(2 20, 20 2) pattern intensity distribution, Power: 5.3 V, 0.27 A, Exposure time: 14 msec, Gain: 1.75, (a) printed an entire image, (b) RHS of horizontal image, (c) LHS of horizontal image, (d) Top of vertical image, (e) Bottom of vertical image, (f) Intensity color bar

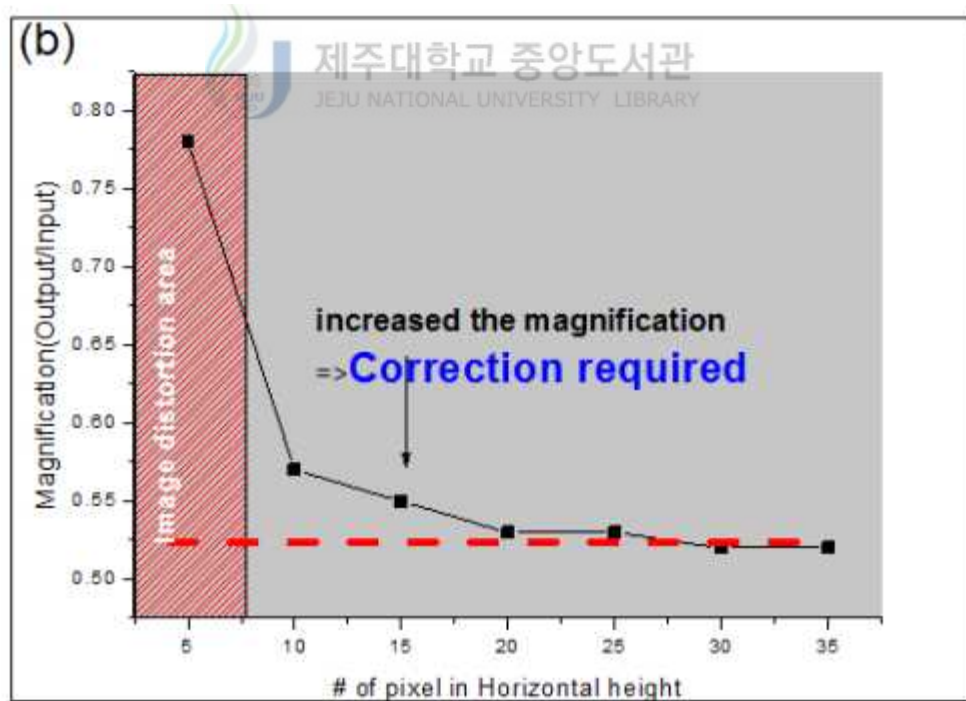
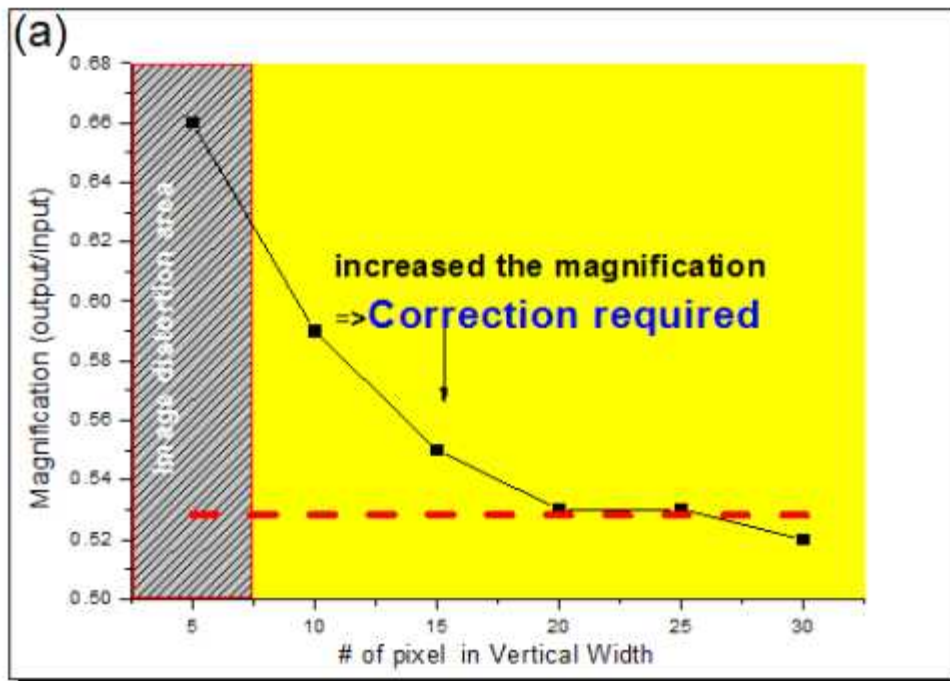
10) Line(15, 400, 40) and space(5 20, 20 5) pattern

그림 38의 입력 이미지는 Line(15, 400, 40)을 기반으로 설계되었다. 전체적으로 일정한 intensity 분포를 보이며 왜곡현상이 이미지의 좌측에서 나타났다. 그림 39의 (e)에서 확연하게 보강간섭이 나타났다.



[Fig. 38] Line(15, 400, 40) and space(5 20, 20 5) pattern intensity distribution, Power: 5.3 V 0.27 A, Exposure time: 31 ms, Gain: 1.75, (a) printed an entire image, (b) RHS of horizontal image, (c) LHS of horizontal image, (d) Top of vertical image, (e) Bottom of vertical image, (f) Intensity color bar

위 결과를 종합하여 그 결과는 그림 39와 같다. 시스템의 해상도를 분석했다. 그림 39(a)는 수직 이미지를 분석한 결과로 폭이 15픽셀에서부터 배율(출력된 길이/입력한 길이)이 급격하게 증가하는 것으로 보아 폭이 15픽셀에서부터 이미지 보정이 필요하다고 판단했으며 8픽셀이하에서는 이미지를 구분할 수 없는 영역으로 보정이 무의미하여 보정하지 않았다. 그림 39(b)는 수평 이미지를 분석한 것으로 수직 이미지 분석결과와 마찬가지로 15픽셀에서부터 배율이 급격히 상승하여 15픽셀에서부터 이미지 보정이 필요함을 파악하였다.



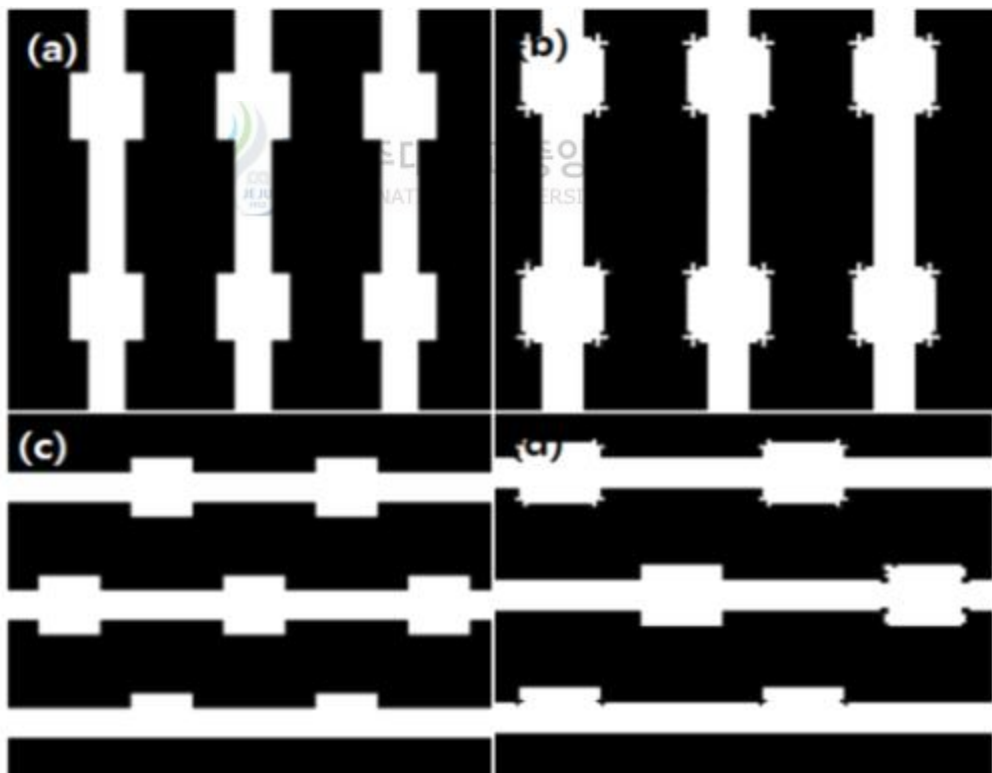
[Fig. 39] Resolution measurement in configured system  
 (a) Resolution graph of vertical image  
 (b) Resolution graph of horizontal image

## 2. 일반적인 OPC를 이용한 이미지 보정 결과

### 1) Line and space(5 20, 20 5) pattern

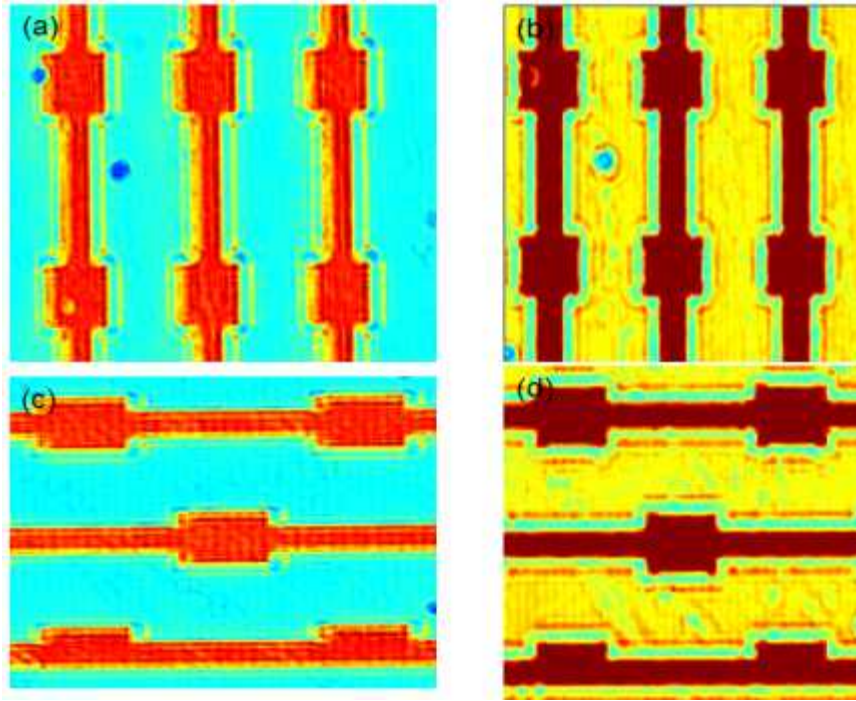
그림 40은 해상도 확인 실험에서 발생한 왜곡 이미지 중에서 앞서 나타낸 그림 36에서 나타낸 이미지 부정확성을 보정하기 위하여 설계된 그림이다. (a)와 (b)는 부정확성이 발생한 이미지 디자인이고 (b)와 (d)는 각각을 일반적인 OPC방법을 이용한 보정 디자인이다.

이 디자인을 통하여 왜곡을 보정하였으며 이를 그림 41과 그림 42에 나타낸바와 같이 이미지의 부정확성 발생이 감소하였으나 완전히 보정하지는 못하였다. 그 이유는 SLM의 해상도 한계로 인한 OPC에 사용된 패턴의 사이즈가 식 5.1, 식 5.2로 계산한 값보다 커서 발생한 것으로 판단했다.



[Fig. 40] Comparison of Line(10, 400, 40) and space (5 20, 20 5) pattern design between uncorrected and corrected by noraml OPC

- (a) Uncorrected vertical design, (b) Corrected design by normal OPC
- (c) Uncorrected horizontal design, (d) Corrected design by normal OPC



[Fig. 41] Comparison of uncorrected and the corrected image

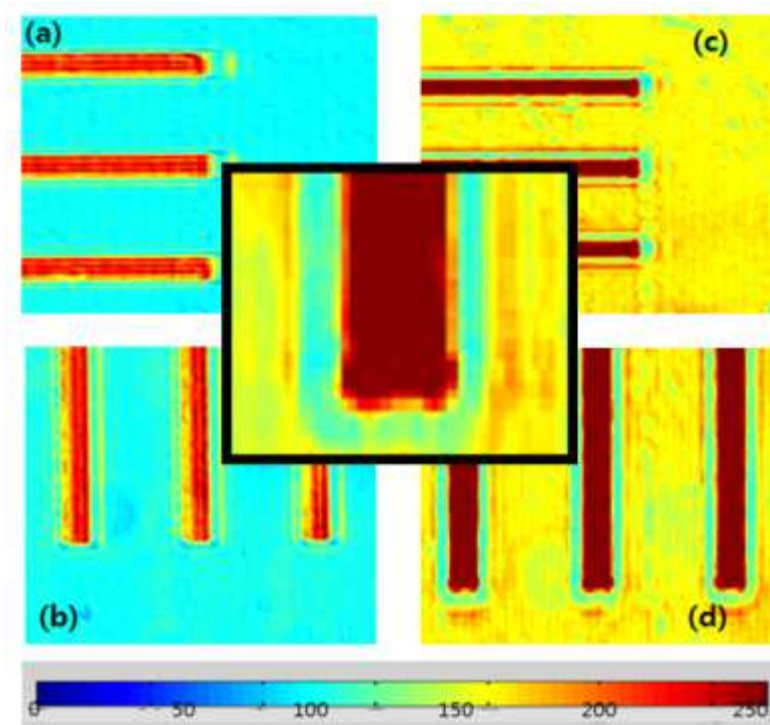
Power: 5.3 V, .027 A, Exposure time: 13 msec, Gain 1.75

(a) Uncorrected vertical image

(b) Corrected vertical image by normal OPC

(c) Uncorrected horizontal image

(d) Corrected horizontal image by normal OPC

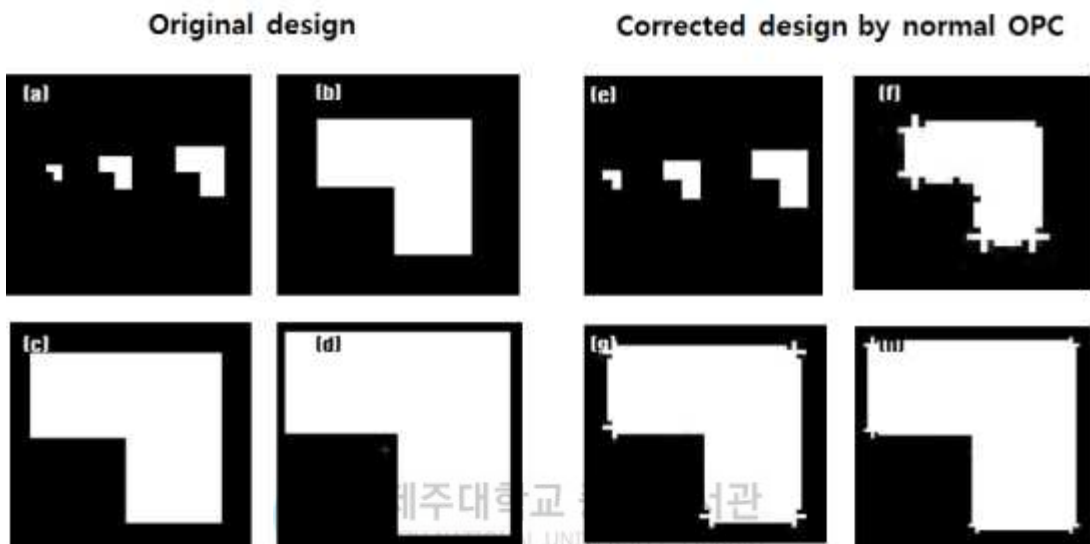


[Fig. 42] Comparison of uncorrected and the corrected image  
 Power: 5.3 V, .0.27 A, Exposure time: 13 msec, Gain 1.75

- (a) Uncorrected horizontal image
- (b) Uncorrected vertical image
- (c) Corrected horizontal image by normal OPC
- (d) Corrected vertical image by normal OPC

2) 'ㄱ' pattern 결과 분석

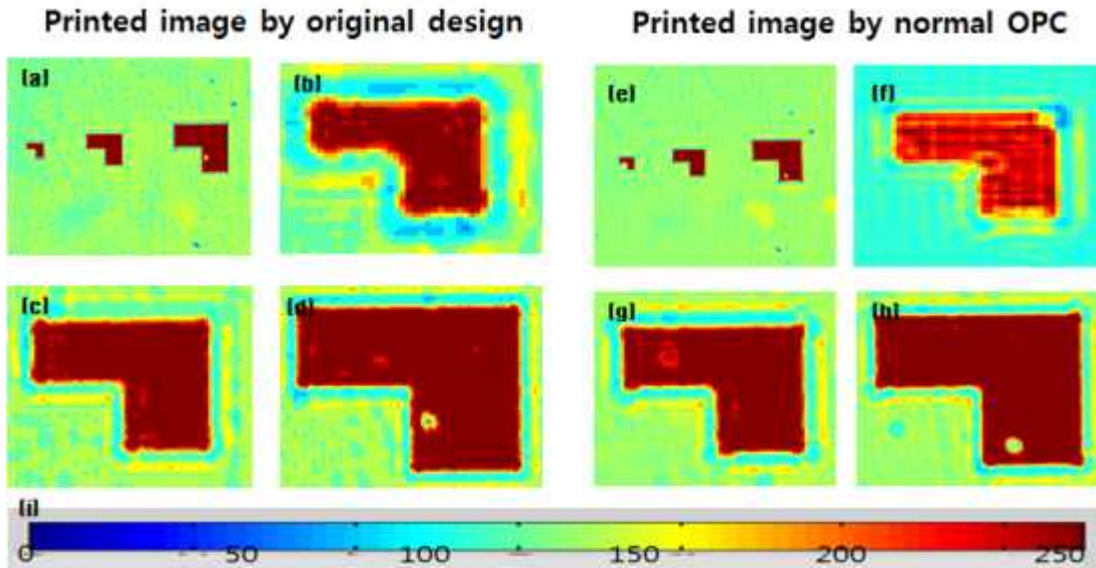
그림 42 (a), (b), (c), (d) 이미지는 'ㄱ' pattern을 나타내기 위한 원본 이미지이다. 그러나 이미지 부정확현상이 그림43 (a), (b), (c), (d)에서 나타낸바와 같이 이미지가 부정확하게 출력되어 그림 43 (e), (f), (g), (h) 디자인으로 보정하여 그림43 (e), (f), (g), (h) 이미지처럼 이미지가 보정되었다.



[Fig. 43] Comparison of uncorrected and the corrected 'ㄱ' design

- (a) Uncorrected an entire design
- (b) Uncorrected small 'ㄱ' pattern design
- (c) Uncorrected medium 'ㄱ' pattern design
- (d) Uncorrected large 'ㄱ' pattern design
- (e) Corrected entire design by normal OPC
- (f) Corrected small 'ㄱ' pattern design by normal OPC
- (g) Corrected medium 'ㄱ' pattern design by normal OPC
- (h) Corrected large 'ㄱ' pattern design by normal OPC





[Fig. 44] Comparison of uncorrected and the corrected 'ㄱ' image  
 Original: Power: 5.1 V, .028 A, Exposure time: 31 msec, Gain 1  
 Correction: Power: 5.1 V, 0.28 A, Exposure time: 36 msec, Gain 1.29  
 (a) Printed an entire image

(b) Uncorrected small 'ㄱ' pattern image

(c) Uncorrected medium 'ㄱ' pattern image

(d) Uncorrected large 'ㄱ' pattern image

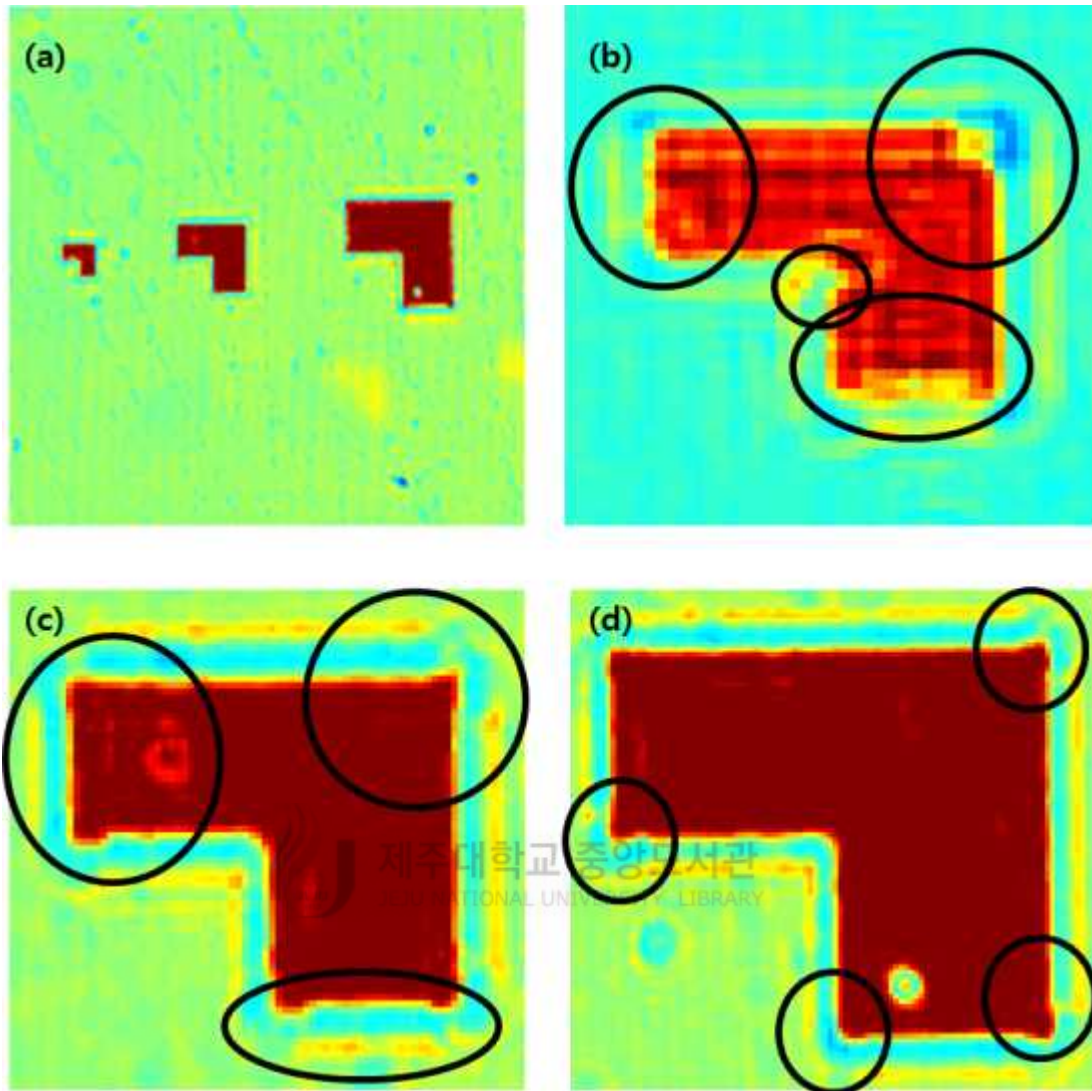
(e) Printed an the corrected entire image by normal OPC

(f) Corrected small 'ㄱ' pattern image by normal OPC

(g) Corrected medium 'ㄱ' pattern image by normal OPC

(h) Corrected large 'ㄱ' pattern image by normal OPC

그림 45는 그림 44에서 일반적인 OPC를 이용한 보정이미지를 확대한 그림이다. 그림에 표시한 바와 같이 모서리부분에서 이미지가 정확히 구현되지 않았다고 판단했다. 특히 작은 패턴에서 왜곡이 심해지는 현상이 나타났다.

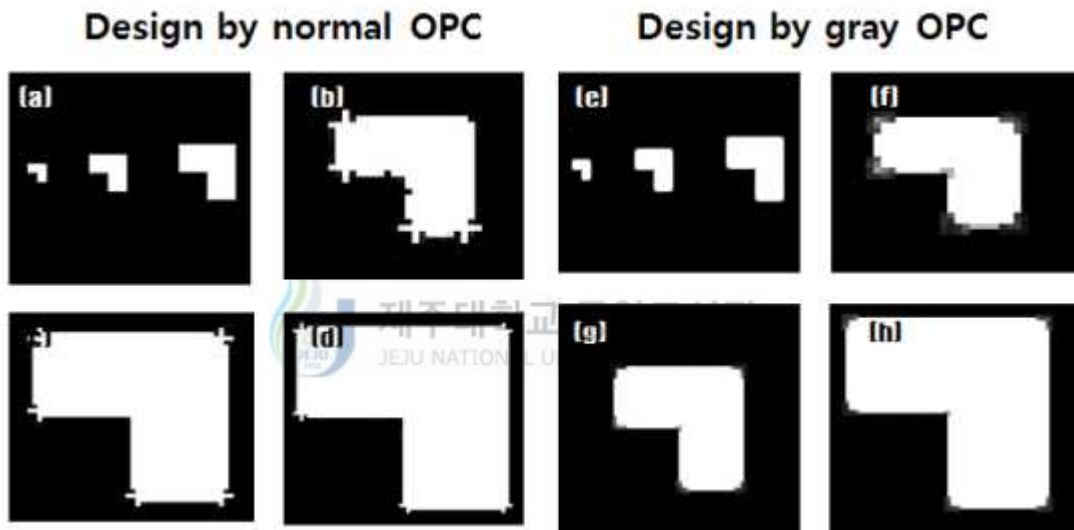


[Fig. 45] Corrected 'ㄱ' pattern image by normal OPC  
 (a) Printed on the corrected entire image by normal OPC  
 (b) Corrected small 'ㄱ' pattern image by normal OPC  
 (c) Corrected medium 'ㄱ' pattern image by normal OPC  
 (d) Corrected large 'ㄱ' pattern image by normal OPC

### 3. 회색조 OPC를 이용한 이미지 보정 결과

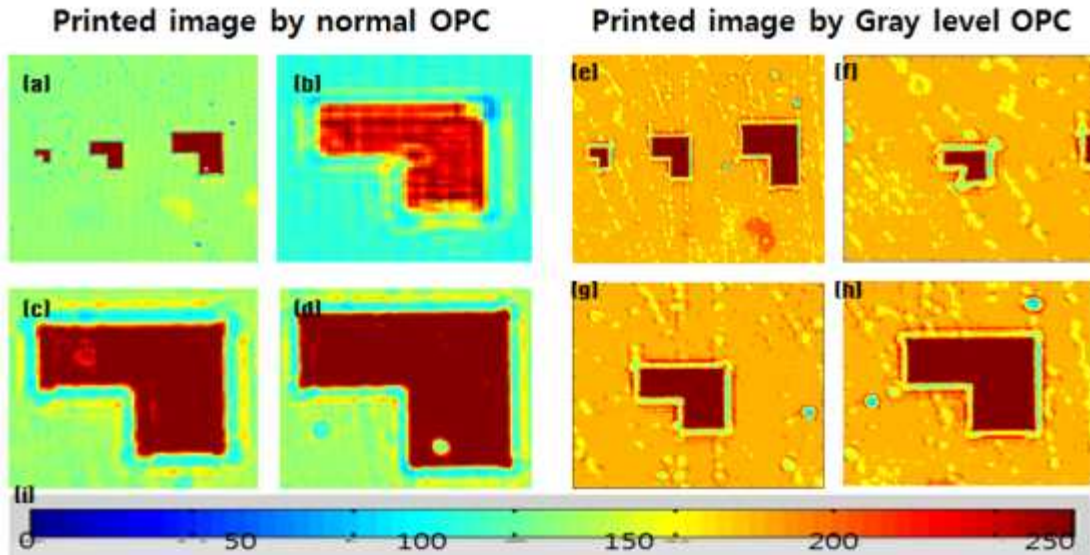
#### 1) 'ㄱ' pattern 보정 결과

앞서 'ㄱ' pattern을 보정한 일반적인 OPC 디자인과 회색조 OPC를 이용한 디자인을 그림 46에 나타냈다. 이 이미지를 출력한 결과 그림 47에서 나타난 것처럼, 회색조 OPC가 이미지보정이 되었다. 그림 48은 그림 46의 모서리 부분을 확대하여 비교한 그림이다. 일반적인 OPC보다 회색조 OPC가 더 정확한 이미지가 출력되었음을 확인했다.



[Fig. 46] Comparison of 'ㄱ' pattern design between normal OPC and gray-level OPC

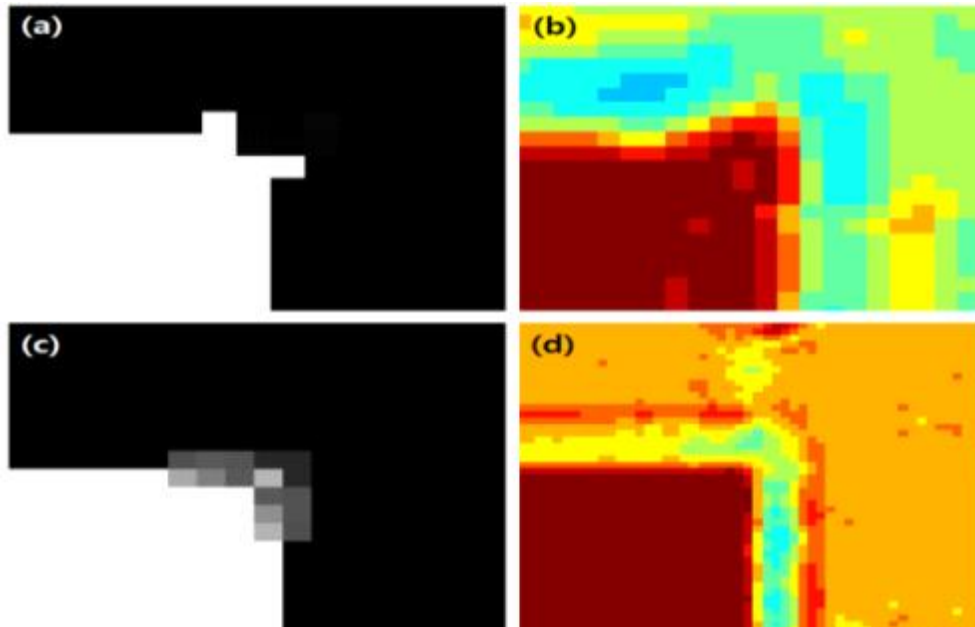
- (a) Corrected an entire design by normal OPC
- (b) Corrected small 'ㄱ' pattern design by normal OPC
- (c) Uncorrected medium 'ㄱ' pattern design
- (d) Uncorrected large 'ㄱ' pattern design
- (e) Corrected entire design by gray-level OPC
- (f) Corrected small 'ㄱ' pattern design by gray-level OPC
- (g) Corrected medium 'ㄱ' pattern design by gray-level OPC
- (h) Corrected large 'ㄱ' pattern design by gray-level OPC



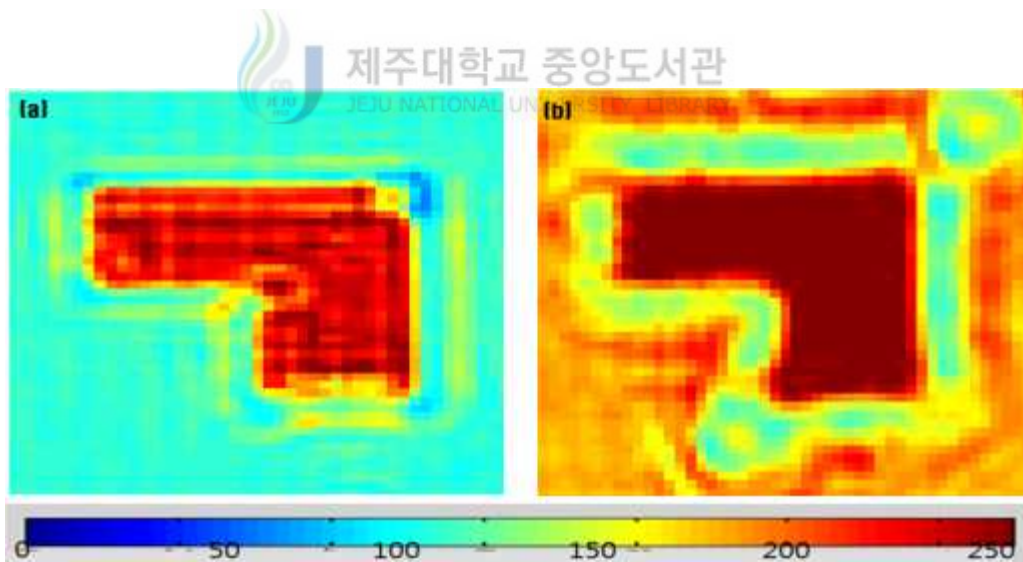
[Fig. 47] Comparison of 'ㄱ' image between normal OPC and gray-level OPC  
 Power: 5.3 V, .027 A, Exposure time: 14 msec, Gain 1.75.

- (a) Printed an entire image
- (b) Corrected small 'ㄱ' pattern image by normal OPC
- (c) Corrected medium 'ㄱ' pattern image by normal OPC
- (d) Corrected large 'ㄱ' pattern image by normal OPC
- (e) Printed an the corrected entire image by gray-level OPC
- (f) Corrected small 'ㄱ' pattern image by gray-level OPC
- (g) Corrected medium 'ㄱ' pattern image by gray-level OPC
- (h) Corrected large 'ㄱ' pattern image by gray-level OPC

그림 47은 일반적인 OPC와 회색조 OPC를 이용한 이미지보정을 비교한 그림이다. 그림에 표시한 부분에 나타난 바와 같이 일반적인 OPC를 이용한 보정이미지에서 광량이 적은 것으로 판단되어 하단부에 이미지 intensity가 낮아 보이나 수직으로 절삭된 부분에서 간섭효과가 발견되어 회색조 OPC를 이용한 이미지보정이 더 효율적이라고 판단했다.



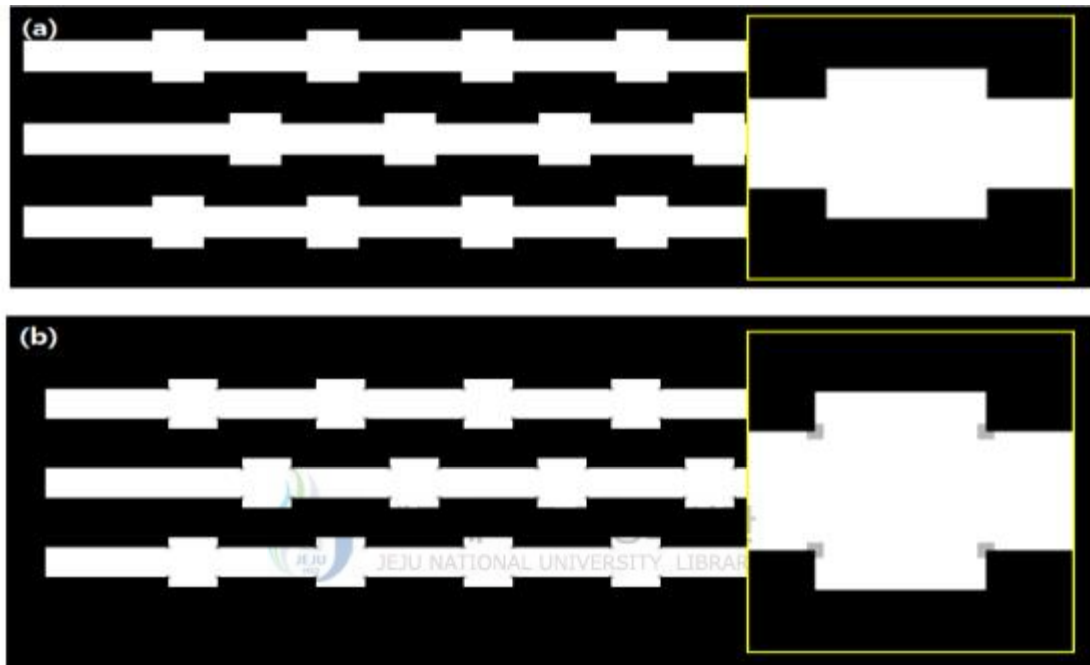
[Fig. 48] Comparison of uncorrected and the corrected 'ㄱ' image  
 (a) Corrected design by normal OPC, (b) Printed image using (a)  
 (c) Corrected design by gray-level OPC, (d) Printed image using (c)



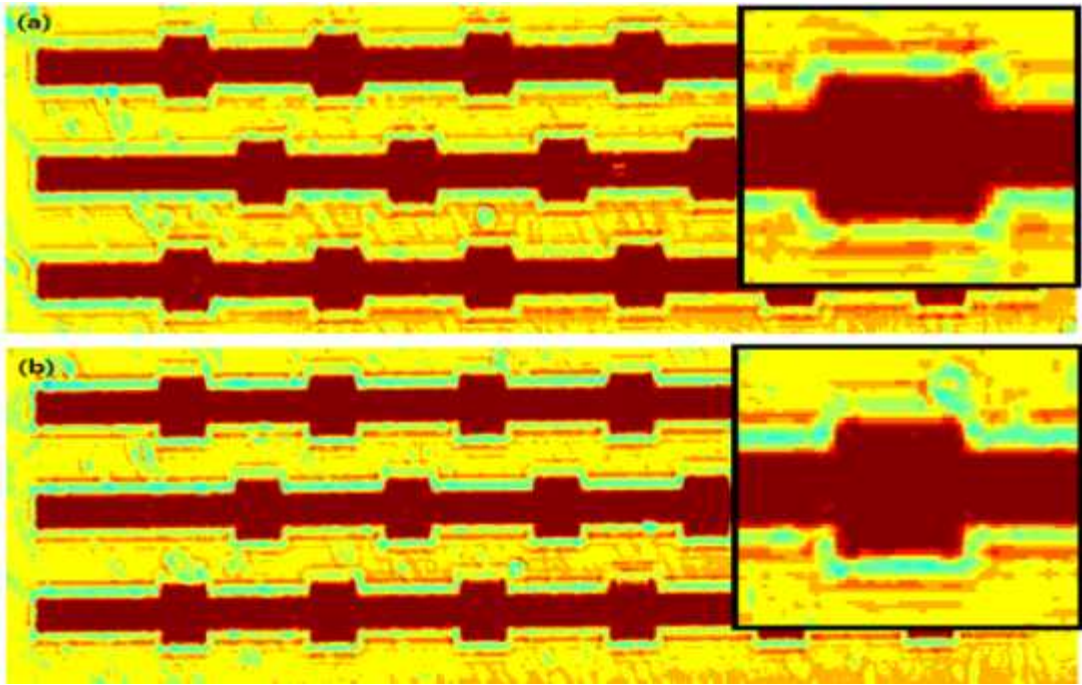
[Fig. 49] Comparison of uncorrected and the corrected 'ㄱ' image  
 (a) Result of corrected design by normal OPC,  
 (b) Result of corrected design by gray-level OPC

2) Line(15, 400, 40) and space(5 20, 20 5) pattern 디자인 보정결과

그림 50은 SLM에 입력한 Line (15, 400, 40)에 line and space(5 20, 20 5) 이미지를 추가한 디자인이다. 그림 50(a)를 (b)와 같이 절벽모양으로 침삭된 이미지를 회색조 OPC로 보정한 디자인이다. 그 결과 그림 51에 나타난 것처럼 이미지가 보정되었음을 확인하였다.



[Fig. 50] Comparison of uncorrected and the corrected Line(15, 400, 40) and space(5 20, 20 5) pattern design.  
(a) Uncorrected design (b) Corrected design by gray-level OPC



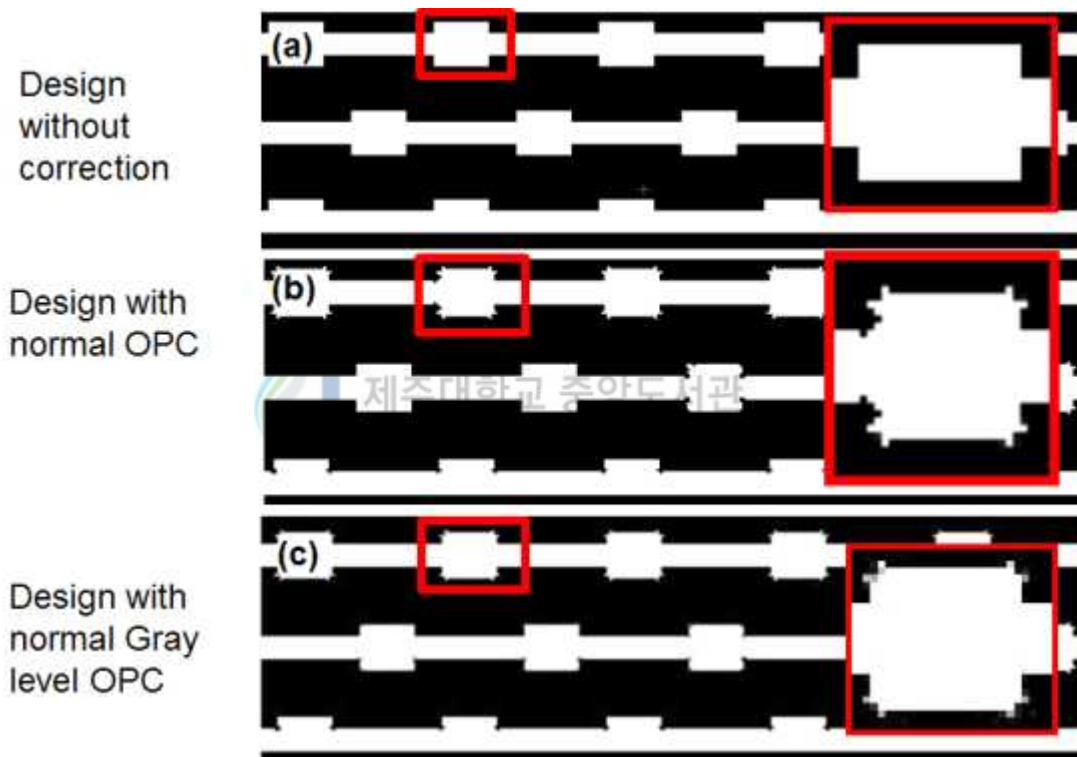
[Fig. 51] Comparison of uncorrected and the corrected image by gray-level OPC.

Power: 5.2 V, 0.27 A, Exposure time: 103 msec, Gain: 1,

(a) Result of uncorrected design, (b) Result of corrected design by gray-level OPC

3) Line(10, 400,40) and space(5 20, 20 5) pattern 디자인 보정결과

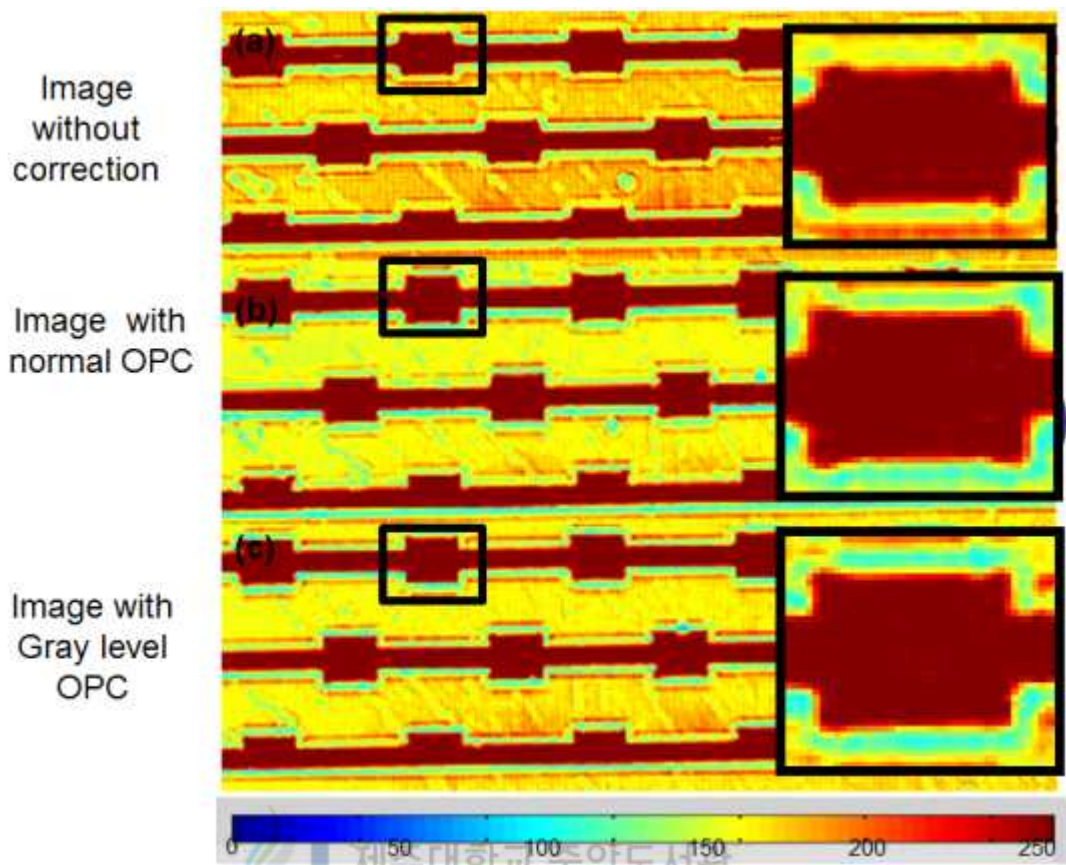
그림 52는 Line(10, 400,40)을 기반으로한 line and space 이미지를 디자인한 그림들이다. 상단은 보정을 하지 않은 디자인이고 중단은 일반적인 OPC를 가지고 보정한 디자인, 하단은 회색조 OPC를 가지고 보정한 이미지이다. 그림 53은 그림 52를 출력한 이미지이다. 일반적인 OPC를 가지고 보정한 이미지 보다 회색조 OPC를 이용한 보정이 수직으로 침식된 부분이나 모서리 부분에서 더 정확한 이미지를 구현하는 것으로 판단했다.



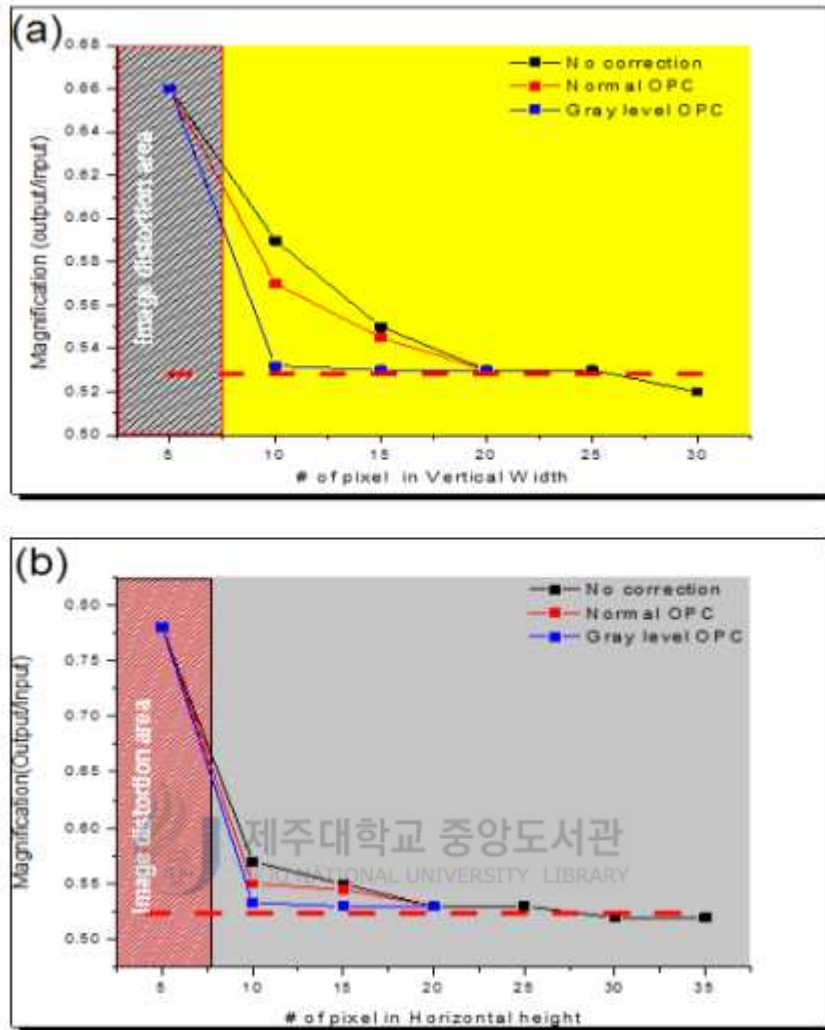
[Fig. 52] Line (10, 400, 40) and space (5 20, 20 5) pattern compared to the uncorrected and corrected design

- (a) Uncorrected design
- (b) Corrected design by normal OPC
- (c) Corrected design by gray-level OPC





[Fig. 53] Comparison of uncorrected and the corrected image  
 (a) Uncorrected image, (b) Corrected image by normal OPC  
 (c) Corrected image by gray-level OPC



[Fig. 54] Comparison of the results of the corrected image using the magnification

(a) Magnification graph of vertical image

(b) Magnification graph of horizontal image

그림 54는 보정전과 후, 전체 이미지의 결과의 배율을 비교한 것이다. 보정한 이미지에서 대체로 시스템 배율인 0.53에 근접하게 보정되었다. 그러나 일반적인 OPC에서 보정에 사용되는 문양은 시스템이 인식할 수 없는 크기이지만 intensity는 인식하기 때문에 보정이 되는 것이다. 그러나 디자인에 사용된 프로그램의 최소 픽셀이 시스템이 인식할 수 없는 문양의 최대 크기보다 이미지 보정에 사용되어 완벽한 이미지보정에 한계가 있었다.

## V. 결 론

OML공정에서 발생하는 왜곡현상을 보정하기 위하여 0.5 배율을 가지는 4-F 시스템을 구축하였다. 구축한 시스템의 정확한 해상도를 확인하기 위하여 포토샵으로 Line 이미지를 설계하여 실제 시스템의 해상도와 배율을 확인하였다. 시스템의 배율은 전반적으로 이론값 0.5배에 근사하게 축소되었다. 해상도 측정 실험에서는 수직 및 수평 이미지 모두 각각 15 pixel부터 배율이 선형적이지 않아 이미지 보정이 필요하다고 판단했다. 그리고 이미지 intensity분포에서도 부정확성이 나타났다. 길이단위로 환산하면 폭 234.375  $\mu\text{m}$ , 높이 219.726  $\mu\text{m}$ 에서부터 이미지의 변형이 발생했다.

해상도 확인 실험의 결과를 기반으로 Line이미지와 line and space 이미지를 설계하여 일반적인 OPC를 통하여 보정하였다. 그러나 포토샵 프로그램의 최소 픽셀이 폭 15.625  $\mu\text{m}$ , 높이 14.6844  $\mu\text{m}$ 로 이론에 의하여 계산된 구축한 시스템의 OPC 적용을 위한 최대 주기값인 1.716  $\mu\text{m}$ 보다 10배 정도 길어 이미지 보정하는데 한계가 있었다.

이를 보완하기 위하여 OML의 장점인 회색조 영상을 OPC에 적용하였다. 이 방법은 SLM의 픽셀 크기가 시스템의 최소 패턴 간격보다 클 때 적용할 수 있으며, 최소 보정영역을 넓히되 픽셀의 명도를 낮추어 이미지를 보정하는 방법이다. 회색조 OPC를 이용하여 보정한 이미지 결과와 일반적인 OPC를 적용한 결과를 비교하여 회색조 OPC가 이미지 보정이 가능함을 확인하였으며 동시에 배율을 이용하여 보다 정확한 이미지가 구현되었음을 확인했다. 그러나 간편한 이미지 보정을 위한 방법에 대한 정보를 확립하지 못하여 추후 회색조 OPC에 대한 규칙성연구를 진행할 계획이다.

## 참 고 문 헌

- [1] Xu Ma, Gonzalo R. Aree, “Computational Lithography”, wiley, p.1-44 (2010).
- [2] 정미숙, 정진호, 채진석, 김혜령, 권대갑, 정훈택, 이용숙, 정수화, 정윤수, 김조빈, 최상대, 정철동, 안상호, 조한솔, 이영욱, 이상진, “maskless 노광기술 개발”, 산업자원부(2007).
- [3] Alfred Kwok-Kit Wong, “Resolution enhancement techniques in Optical Lithography”, SPIE, p.94-115 (2001).
- [4] Marshal Miller, “Mask Edge Effects in Optical Lithography and Chip Level Modeling Methods”, University of California Berkeley, p.13-20 (2010).
- [5] Xu Ma, Gonzalo R. Aree, “Pixel-based simultaneous source and mask optimization for resolution enhancement in optical lithography”, Optics Express, Vol. 19, Iss. 3, p.2165-2180 (2011).
- [6] 마동성, 장광남, 이정일, 이유중, 김동명, 이명복, 전성민, 한일기, “초미세 패턴 및 응용기술개발”, 과학기술처 (1989).
- [7] Joseph W. Goodman, “Introduction to Fourier Optics”, McGraw-Hill (1996).
- [8] 홍순관, “PCB 제조기술 입문”, 복두 출판사, 제2판 (2002).
- [9] Xu Ma, Gonzalo R. Aree, “Pixel-based simultaneous source and mask

optimization for resolution enhancement in optical lithography”, Optics Express, Vol. 17, Iss. 7, p.5783–5793 (2009)

[10] XIAOFEI WU, Shiyuan LIU, Wei LIU, Tingting ZHOU, Lijuan Wang, “Comparison of three TCC calculation algorithms for partially coherent imaging simulation”, SPIE, Vol. 7544 (2010).

[11] 강민형, “Maskless lithography system을 이용한 스트레인 게이지 패턴 제작”, 인하대학교 (2010)

[12] T.Brunner, “Impact of lens aberrations on optical lithography”, IBM J.Res.Develop., Vol. 41, no.1/2, (1997).

[13] Michael S.Yeung, “Measurement of Wave-Front Aberations in High-Resolution Optics Lithographic Systems from Printed Photoresist Pattern“, IEEE, Vol.13, No.1 (2000).

[14] Sang-Kon Kim, “Polarized Effects in Optical Lithography with High NA Technology”, JKPS, Vol. 50, No. 6, pp. 1953~1958 (2007).

[15] G. V. Belokopytov, Yu. V. Ryzhkova, “ Optical Maskless Lithography”, RUSSIAN MICROELECTRONICS, Vol. 40 No.6, pp. 453~467 (2011)

[16] Peng Yu, Weifeng Qiu, David Z. Pan, “Fast Lithography Image Simulation By Exploiting Symmetries in Lithography Systems”, IEEE, Vol. 21 Iss. 4, (2008)

[17] Xu Ma, Gonzalo R. Arce, “PSM design for inverse lithography with partially coherent illumination”, OPTICS EXPRESS, Vol. 16, No.24 (2008).

[18] John Allgair, Michelle Ivy, Kevin Lucas, John Sturtevant, "Characterization of Optical Proximity Correction Features", SPIE, Vol. 4344 (2001).

[19] Nicolas B. Cobb, Avidesh Zakhor, Mehran Reihani, Farvardin Jahansooz, Vijaya N. Raghavan, "Experimental results on optical proximity correction with variable-threshold resist model", SPIE, Vol. 3051(1997).

[20] J. Fung Chen, Tom Laidig, Kurt E. Wampler, Roger Caldwell, "Optical proximity correction for intermediate-pitch features using subresolution scattering bars", JVSTB (1997).

[21] Peng Yu, David Z. Pan, "TIP-OPC: A New Topological Invariant Paradigm for Pixel Based Optical Proximity Correction", IEEE, pp. 847-853 (2007).



[22] Konstantinos Adam, Robert J. Socha, Mircea V. Dusa, Andrew R. Neureuther, "Effect of reticle CD uniformity on wafer CD uniformity in the presence of scattering-bar optical proximity correction", SPIE, Vol. 3546 (1998).

[23] Peng Yu, Sean X. Shi, David Z. Pan, "True process variation aware optical proximity correction with variational lithography modeling and model calibration", SPIE, Vol.6, Iss. 3 (2007).

[24] Puneet Gupta, Andrew B. Kahng, Dennis Sylvester, Jie Yang, "Performance-driven optical proximity correction for mask cost reduction" Vol 6, Iss. 3 (2007).

[25] Stephen Y. Chou,a) Peter R. Krauss, Wei Zhang, Lingjie Guo, and Lei Zhuang, “Sub-10 nm imprint lithography and applications”, AVS, Vol. 15, No. 6 (1997)

[26] Yi Xiong, Zhaowei Liu, Xiang Zhangie, “Projecting deep-subwavelength patterns from diffraction-limited masks using metal-dielectric multilayers”, AIP, (2008)

[27] Zongsong Gan, Yaoyu Cao, Richard A. Evans, Min Gu, “Three-dimensional deep sub-diffraction optical beam lithography with 9 nm feature size”, Macmillan, (2013)

[28] “True Process Variation Aware Optical Proximity Correction with Variational Lithography Modeling and Model Calibration“,

[29] R. Jonckheere, A. Wong, A. Yen, K. Ronse, L. Van den hove, “Optical proximity correction: Mask pattern-generation challenges”, Microelectronic Engineering 30, Vol. 30, Iss. 1-4, pp. 115-118 (1995).

[30] Anthony Yena, P. Tzviatkovb, A. Wong, C. Juffermanse, R. Jonckheere, P. Jaenen, J. Garofalod, O. Ottoe, K. Ronse, and L. Van den hove, “Optical proximity correction for 0.3  $\mu\text{m}$  i-line lithography”, Microelectronic engineering 30, pp. 141-144 (1996)

[31] H. Zhang, J. Morrow, F.M. Schellenberg, “Optical proximity correction: A detail comparison of techniques and their effectiveness”, Microelectronic Engineering, Vol. 41-42, pp. 79-82 (1998)

[32] Puneet Gupta, Andrew B. Kahng, Dennis Sylvester, “Performance-driven optical proximity correction for mask cost reduction”, J. Micro/Nanolith, Vol. 6 (2007).

[33] Pei-Shan Wu<sup>1</sup>, Yu-Cheng Lin, Jui-Hung Hung<sup>3</sup>, Tsai-Ming Hsieh, “Optical Proximity Correction Using a New Hyper Error Estimation Method”, ICCSEE, France (2013)

[34] TEH SIEW HONG, “PERFORMANCE-BASED OPTICAL PROXIMITY CORRECTION”, SINGAPORE Univ, (2011).

[35] Michael Fritze, Brian M. Tyrrell, David K. Astolfi, Renee D. Lambert, Donna-Ruth W. Yost, Anthony R. Forte, Susan G. Cann, and Bruce D. Wheeler, “Subwavelength Optical Lithography with Phase-Shift Photomasks”, LINCOLN LABORATORY JOURNAL, Vol. 14, No. 2 (2003)

[36] CAI YiCi, ZHOU Qiange, HONG, XianLong, SHI Rui, WANG Yang, “Application of optical proximity correction technology”, China Ser F-Inf Sci, Vol. 51 No.2, pp. 213-224 (2008)

[37] SHEN Xuan, SHI Zheng, “Segmentation Optimization Method for Optical Proximity Correction Based on Lithography Model”,

[38] Lieve Van Look, Joost, Bekaert, Bart Laenens, Geert Vandenberghe, Jan Richter, Karsten Bubke, Jan Hendrk Peters, Koen Schreel, Mircea Dusa, “Experimental Study of Effect of Pellicle on Optical Proximity Fingerprint for 1.35 NA immersion ArF Lithography”, SPIE, Vol. 7640 (2010)



## 감사의 글

졸업 논문작성 마지막에 ‘감사의 글’을 작성하고자 하니 지난 6 년 동안의 실험실 생활이 떠오릅니다.

먼저, 많이 부족한 저를 위해 항상 아낌없는 조언과 격려를 해주신 이현주 교수님께 진심으로 존경과 깊은 감사를 드립니다. 그리고 학위논문을 심사해주시고 항상 웃으시며 조언해주신 유영훈 교수님, 복도에서 뵈 때마다 저를 격려해주신 천원기 교수님과 제가 학생회장할 때에 아낌없는 지원과 조언을 해주신 이윤준 교수님, 박재우 교수님, 바쁘신 와중에도 제 질문에 항상 웃으시며 답변해주신 김남진 교수님, 최수석 교수님, 이연건 교수님께 감사드립니다.

제가 플라즈마에 관심을 갖게 해주신 지훈이형, 힘들 때 마다 길을 제시해 주신 상범이형, 민국이형, 늦은 시간에도 항상 전화 받아준 세민이형, 인제형에게 감사드립니다. 그리고 항상 믿고 따라준 민규, 승현이와 “형아~” 익준이, 막내 같은 소원이, 모자라지만 착한 상현이와 상윤이에게 매우 고맙다는 말을 전합니다. 또한 제가 후배라는 이유로 아낌없이 조언해주시는 보안이형, 영준이형, 영민이형, 성식이형, 바로형, 우연이형, 우중이형에게 감사드립니다. 대학원 동기인 승신이형과 덕우와 남은 대학원생활이 많은 동재, 영규, 정민이, 에너지공학과를 위해 항상 힘써주시는 박경호 조교선생님, 모용현 조교선생님 그리고 에너지공학과 모든 선후배님들에게도 감사드립니다.

항상 바쁘신 와중에도 실험물품 발주지원에 도움을 주신 양진비엘텍 진호형, 창림이형에게도 감사드립니다.

마지막으로 언제나 저를 사랑해주시고 믿어주시는 부모님, 귀여운 동생 언경이, 연진이 할아버지, 할머니 가족 모두 정말사랑하고 감사합니다. 저를 아껴주고, 사랑해주시는 모든 분들에게 이 논문을 드립니다.