




## 레이저 직접 묘화를 이용한 광도파로 제작

|   |                |
|---|----------------|
|  | <b>신 보 성</b>   |
|   | <b>한국기계연구원</b> |


- 지능형정밀기계연구부 책임연구원
- 관심분야 : 레이저 미세가공, 나노가공 및 공정개발
- E-mail : shinbs@kimm.re.kr

|  |                |
|--|----------------|
|  | <b>서 정</b>     |
|  | <b>한국기계연구원</b> |

- 첨단산업기술연구부 책임연구원
- 관심분야 : 정밀접합, 레이저 미세패터닝
- E-mail : jhkwon@nongae.gsnu.ac.kr

|   |                |
|---|----------------|
|  | <b>김 정 민</b>   |
|   | <b>한국기계연구원</b> |

- 지능형정밀기계연구부 위촉연구원
- 관심분야 : 폴리머 및 박막재료, 재료특성평가
- E-mail : jungmin@kimm.re.kr

|   |                  |
|---|------------------|
|  | <b>안 승 호</b>     |
|   | <b>한국전자통신연구원</b> |

- 반도체 · 원천기술연구소 선임연구원
- 관심분야 : 광접속 소자, 광도파로 소자, 광특성평가
- E-mail : shahn@etri.re.kr

### 1. 연구개발 목표

#### 1.1 연구개발의 필요성

광대역 종합정보시스템의 실현과 더불어 대용량 정보전송을 가능케 하는 광통신 발전이 눈에 띄게 가시화 되고 있다. 이에 따라 초고속, 광대역 통신 시스템과 신호처리 시스템에서 광회로의 집적화가 요구되고, 평판 광소자의 역할이 커지고 있다. 지금까지는 이러한 광소자 및 부품들은 반도체 재료와 무기 실리카 계열의 재료를 근간으로 발전되어 왔으나, 고가이며 상용화에는 부적합하다. 이에 비해 유기고분자 소재는 분자화학에 의해서 물질의 성능을 쉽게 제어할 수 있으며, 가격이 저렴하고, 응답속도가 빠르고, 광대역폭이 넓으며, 소자 제작 공정이 저온에서 매우 단순하고, 가공성이 좋고, 집적화가 매우 유리하다.

레이저 직접 묘화 시스템(LWS : Laser-Beam Writing System)은 광학용 소자의 굴절률을 변화시킬 수 있는 결상식 방법은 광학소재 내부에 도파로를 만들 수 있으며, 식각식 방법은 표면의 도파로를 형성시켜 광학용 소자의 다용도 부품을 형성할 수 있다. 이에 이 두 시스템을 하나의 복합형으로 결합한 시스템은 미래의 고부가가치 시장을 형성하는 광소자 제작 시장의 중요한 부분을 형성할 뿐 아니라 MEMS 부품, Bio MEMS 부품에 이르는 다양한 응용범위를 갖는 응용 시스템을 구성할 수 있을 것으로 예

상된다.

LWS은 선진국에서도 아직 본격적으로 상용화가 이루어지지 않고 있는 첨단기술로 각국에서 다양한 방법으로 연구가 진행 중에 있으며, 기술적으로 아직 성숙단계에 있지 못한 상태이다. 따라서 본 과제를 수행함에 있어 기존의 레이저 가공기술을 이용하여 시스템을 개발하고, 이러한 LWS를 구현하는데 많은 노력이 필요할 것으로 예상된다.

LWS로 광소자를 구현하기 위해서는 기존의 일부 확보되어 있는 정밀 레이저 가공기술을 기반으로 정밀한 제어기술 및 제조공정기술의 확보를 통하여 단일모드, 다중모드 및 다양한 곡선형태의 광소자 구현 기술개발이 요구된다. 동 과제를 위해서는 LWS 설계기술, 정밀 제어기술, 저손실 고분자 소재기술, 광소자 제조공정기술 및 특성평가기술 등 종합적인 연구개발이 필요하며, 이 분야의 전문기술을 가진 연구 그룹이 국내에는 부족한 상태여서 체계적이고, 집중적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 LWS을 이용하여 광통신용 광도파로 소자의 저가격화 및 공정의 단순화를 실현시킬 수 있을 뿐 아니라 마이크로 광학 요소의 굴절률 및 회절률의 변화를 주기 위한 미세구조 제작에 응용이 가능하다. 저손실 선형 광학 고분자 소재 또는 저손실 고분자 광도파로 소재를 이용하며, 이들의 낮은 광도파로 손실, 높은 열 광학효과 및 편리한 가공성을 이용한 고분자 도파로 광소자 개발이 필요하다.

본 연구의 목표는 경제적으로 대용량 정보를 고속 전송할 수 있도록, 광통신용 대면적 폴리머 광소자 제작을 위한 대면적 고해상도를 가지는 레이저 빔 직접 묘화(Laser Beam Direct Writing) 공정, 재료, 설계 및 시스템을 제작하는 것이다.

## 1.2 기술의 혁신성 및 독창성

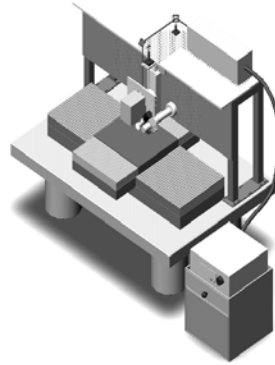


그림 1. 레이저 직접묘화 시스템의 개략도

본 연구에서는 대면적 고해상도 LWS 개발은 193 nm, 248 nm, 355 nm의 다양한 UV 파장영역을 갖는 ArF, KrF, 3rd harmonic DPSS, Ar ion 레이저 등을 적용함으로써 다양한 UV 파장에 대한 폴리머의 식각특성과 결상시에 나타나는 광반응의 변화를 다각적으로 관측할 수 있으며 또한 나노 단위를 펄스영역에서 펨토단위의 펄스로 변화됨에 따라 나타나는 식각 및 결상의 결과를 얻어낼 수 있으며, 이러한 결과를 바탕으로 고부가가치를 갖는 광소자의 대량 생산을 위한 식각, 결상의 복합형 레이저 직접 묘화 시스템을 구현할 수 있다. 평면형 광도파로 소자의 구현을 위해 레이저 직접묘화 기법을 이용하며, 이 기법은 기존의 기법들이 필요로 하는 복잡한 공정, 고가의 장비 및 긴 공정시간 등을 극복하고 저렴한 가격으로 다양한 형태의 광소자를 단기간에 제조할 수 있다. 또한 레이저 직접 묘화 기법은 고분자에 레이저 빛을 조사하여 굴절률을 변화시킴으로써, 광도파로의 구현이 가능하며, 정밀하고 재현성 있는 이송장치 및 광학계를 이용하여 단일모드, 다중모드의 직선 또는 곡선형태의 광소자 제작이 가능하다.

## 2. 연구 내용 및 결과

2.1 레이저 직접 묘화 시스템

2.1.1 DPSS 레이저 시스템

광도파로 제작을 위해 레이저 직접 묘화 시스템은 DPSS 레이저 시스템이다. 사용한 레이저는 고체상태의 레이저로 Q-Switched Diode-Pumped Solid-State 레이저(Coherent Co.)이며 자세한 사양은 표 1과 같다.

표 1. DPSS 레이저의 주요사양

|                      |   |
|----------------------|---|
| Model                | AVIA 355-1500   |
| Laser source         | Neodymium doped yttrium vadadate (Nd:YVO <sub>4</sub> ) |
| Wavelength           | 355 nm (3rd harmonic)                                   |
| Average Output Power | > 1.5 watts at 15 kHz                                   |
| Spatial Mode         | TEM <sub>00</sub> ( M <sup>2</sup> < 1.3 )              |
| Beam Divergence      | < 0.3 mrad  |
| Beam Diameter        | 2.2 mm @ 1/e <sup>2</sup>                               |
| Pulse Repetition     | 1 ~ 100 kHz   |
| Pulse Duration       | < 40 ns   |

전체적인 시스템 구성도는 그림 2와 같이 선속 확대기(beam expander), 반사경(mirror), 제어시스템(control system), 측정장비(measurement equipment), PC, 레이저 소스(laser source)와 같은 많은 구성 요소들로 이루어져 있으며, PC 내부에 화상 처리기, 모션 컨트롤러 등을 장착하여 모션 제어, 레이저 제어 및 모니터링을 할 수 있도록 하였다. 각 장치들을 레이저 직접묘화에 응용하기 위해서는 그에 대한 특징을 파악하는 것이 우선이다. 기본적으로는 레이저 빔의 출력 특성과 이송부의 정밀도가 가장 고려되어야 하며 그 특징을 살펴보면 Laser On/Off, Scan delay, Scan speed, Repetition Rate 및

Laser Power 등이 중요 변수라 할 수 있다. 따라서 우선 광학계 구성을 위한 빔의 특성 측정과 이송부의 정밀도 측정을 하였고 도파로 제작을 위한 기초 실험을 수행하였다.

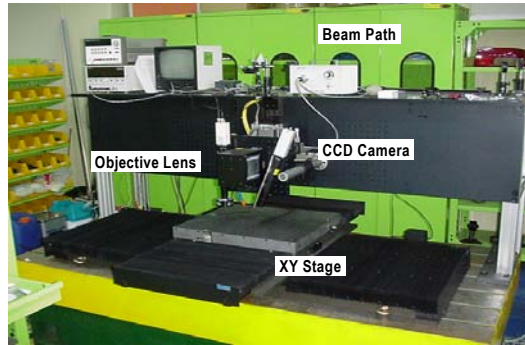


그림 2. DPSS 레이저 시스템

또한 가공 소프트웨어는 PMAC 제어기를 장착한 PC 기반의 백러쉬 효과가 없는 XYZ 스테이지를 사용함으로써 도파로의 위치정도, 선속정도 및 묘화속도를 향상시킬 수 있다. 도파로 형상의 데이터 생성은 CAM S/W를 사용하여 데이터를 추출한 후 가공을 하였다. 미세한 도파로의 형상을 직접적으로 제작하기 위해 개발된 공정은 그림 3이다. 가공데이터는 제작하는 형상의 외부를 제거해야 하므로 가공 재료의 윤곽을 포함하여 생성하도록 한다.

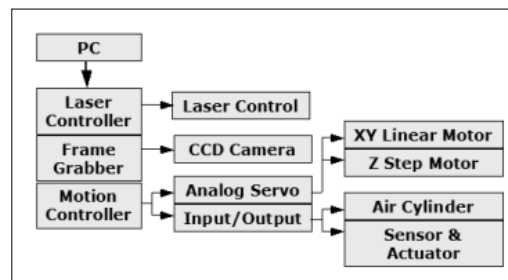


그림 3. 레이저 직접묘화 공정을 위해 소프트웨어

2.1.2 Ar ion 레이저 시스템

본 연구에서 사용하고자 하는 레이저 직접 묘화 장비는 Ar ion 레이저 시스템이며 그림 4와

같다. 레이저 빔의 조사량은 빔 출력과 물의 회전수 및 회전당 레이저 빔 펄스 수에 의하여 제어된다. 본 실험장치는 고속 회전하는 물(초정밀 인쇄용)에 레이저 광경화 미세패터닝을 위한 것으로 본 연구의 평판용 레이저 직접 묘화 실험에 활용하기 위하여 물을 제거하고 레이저 빔 경로상에 폴리머가 코팅된 wafer를 수직으로 세울 수 있는 장치를 구성하였다. 레이저 빔 전송을 위한 광학계는 빔의 on/off는 A/O 모듈레이터로 제어된다. 또한 레이저 발전기에서의 레이저 빔 출력과 실제 폴리머 코팅층에서 집속되는 레이저 빔 출력과는 큰 차이가 있어, 각 위치별로 레이저 빔 출력변화를 조사하여 기초 실험을 수행하였다.

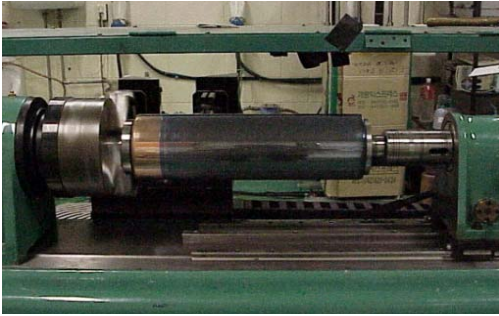


그림 4. 아르곤 레이저 직접묘화 시스템

표 2. Ar ion 레이저의 주요사항

|                      |                                   |
|----------------------|-----------------------------------|
| Laser source         | Ar ion                            |
| Wavelength           | 336 ~ 363.8 nm (Multi line)       |
| Average Output Power | 1.0 watts                         |
| Spatial Mode         | TEM <sub>00</sub> ( $M^2 = 1.5$ ) |
| Beam Divergence      | 0.5 mrad                          |
| Beam Diameter        | 1.5 mm                            |

## 2.2 기초 실험 결과

### 2.2.1 DPSS 레이저 시스템을 이용한 광도파로 제작

본 연구에서 사용한 폴리머 소재는 광경화성 폴리머인 ZPLW206이다. ZPLW206은 ZPU12-46과 같은 계열인 플루오르 성분의 폴리머이며, DPSS 레이저 파장대에서 경화가 잘 일어나게 하기 위해 355nm에서 광에 민감한 광개시제 (photoinitiator)를 코팅층 성분의 2%정도 첨가하였다. 광경화 실험을 위한 시편은 실리콘 웨이퍼 상에 ZPLW206 폴리머를 코팅하였으며, 코팅층 두께는 광개시제 성분의 UV 감광을 고려하여 8 $\mu$ m로 하였다. 가공 시 공기 중의 탄소와 같은 오염물질로 인해 폴리머 소재가 서로 가교 결합되어 망상구조를 이루는 것을 파괴할 수 있으므로, 질소 분위기에서 기초 실험을 수행하였다. 표 2는 레이저 출력 0.7~2.7mW, 묘화속도 3,600mm/min, 포커싱 높이 0 $\mu$ m 범위에서 얻어진 ZPLW206 폴리머의 광경화 선폭을 정리한 것이며, SEM 이미지는 그림 5 (a) ~ (c)에 나타나 있다. 이는 레이저 빔의 모양이 가우시안 분포를 가지는 TEM<sub>00</sub> 모드로 가운데 부분의 레이저 파워가 높으며 레이저 빔 조사 시 폴리머 재료의 응력에 의해 사다리꼴 형태의 도파로가 형성되었다. 레이저 파워가 0.7mW 일 때의 도파로 형상은 위쪽 선폭 17.8 $\mu$ m, 아래쪽 선폭 23.2 $\mu$ m, 높이 7.45 $\mu$ m이었다. 레이저 파워가 높아짐에 따라 도파로 형상의 표면은 거칠어지며, 가운데 부분이 어블레이션 되어지는 모양을 보이며, 이는 레이저 빔 조사 시 폴리머가 경화되는 동시에 어블레이션 되는 것으로 판단된다.

### 2.2.2 Ar ion 레이저 시스템을 이용한 광도파로 제작

본 연구에서 사용한 폴리머 소재는 광경화성 폴리머인 ZPU12-460이다. 광경화 실험을 위한 시편은 실리콘 웨이퍼 상에 ZPLW206 폴리머를 코팅한 상태에서 제공받았으며, 코팅층 두께는

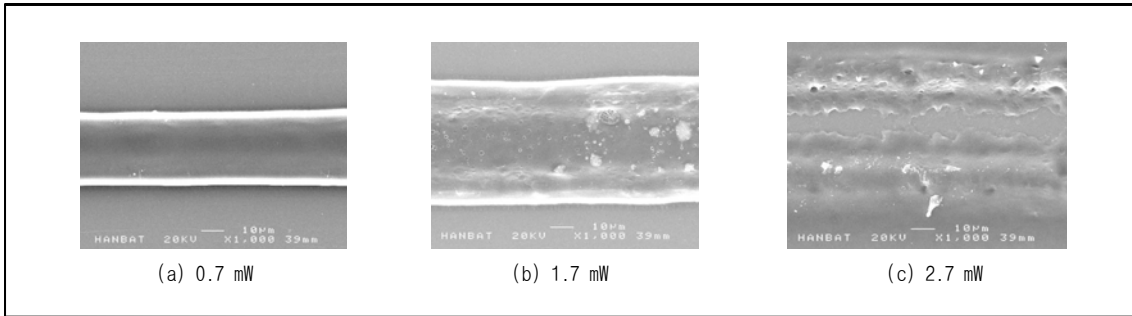


그림 5. 묘화 속도 3,600 mm/min, 레이저 파워를 변화하였을 때 형성된 도파로의 SEM 촬영 이미지

표 3. 공정조건에 변화에 따른 도파로의 선폭, 높이 변화

| Material (polymer) | Power [mW] | Writing speed [mm/min] | Line width [ $\mu\text{m}$ ] |
|--------------------|------------|------------------------|------------------------------|
| ZPU12-460          | 150        | 4,000                  | 29                           |
| ZPU12-460          | 150        | 3,000                  | 30                           |
| ZPU12-460          | 150        | 2,000                  | 31                           |

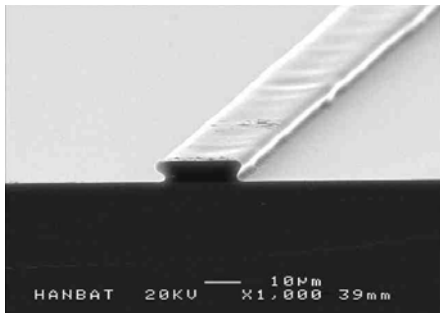


그림 6. 그림 5 (a) 도파로 단면의 SEM 촬영 이미지

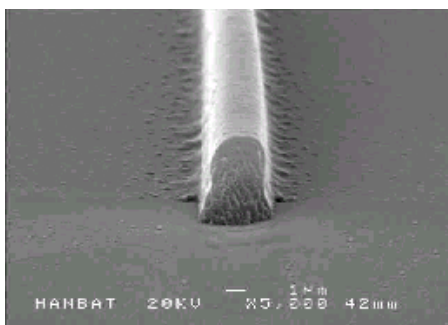


그림 7. 레이저 파워가 30 mW(실제 약 1mW), 묘화속도 3,000 mm/min일 때 형성된 도파로의 단면 형상

UV 감광을 고려하여  $8\mu\text{m}$ 로 하였다. 실험 방법은 2단계로 구분하여 수행하였다. 1단계에서는 적절한 광경화 조건을 확보하기 위해 기존에 수행한 데이터에 근거하여 도파로용 폴리머의 광경화성을 분석하고, 2단계에서는 선폭  $10\mu\text{m}$ 이하의 경화선폭을 얻기 위한 실험을 수행하였다.

표 3은 레이저 출력 150mW, 레이저 빔 이동속도 2,000~4,000mm/min 범위에서 얻어진 도파로의 선폭을 정리한 것이다. 여기서 레이저출력 150 mW는 레이저 발전기에서의 출력이며, 실제 시편에 집속되는 레이저 빔 출력 5~6mW 수준이다. 실험결과 2,000~4,000mm/min 범위의 레이저 빔 묘화 속도에서의 광경화 선폭의 변화는 거의 없음을 알 수 있다. 형성된 도파로는 SEM 촬영 결과, 높이가 약  $6.4\mu\text{m}$ 인 사다리꼴의 형태를 보여주고 있다. 광경화 후 현상할 시 두께방향으로도 약간 꺾이는 현상이 있었을 것으로 판단된다.

선폭  $10\mu\text{m}$  이하의 도파로 선폭을 얻기 위하여 레이저 출력을 30mW 수준으로 감소시키고 레이저 빔 묘화속도는 3,000mm/min 으로 하였

다. 시편에 약1 mW 수준의 레이저 빔이 집속됨을 알 수 있었으며, 레이저 빔 집속위치를 변화시키면서 얻어진 도파로의 SEM 사진을 그림 7에서 보여주고 있다. 초점에서 약 상부가 2 $\mu$ m, 하부가 4.5 $\mu$ m인 경화선의 단면형상을 관찰할 수 있다.

### 2.2.3 광도파로 모드 측정

광도파로는 진행하는 모드간에 서로 직교성이 존재하여 모드간 에너지가 교환되지 않는다. 모드간 파워분배는 입사광의 분포가 얼마만큼 고유 모드와 유사한가에 따른다. 광도파로의 모드수를 측정하는 방법은 광도파로의 입력단에 1550nm LD source에서 나온 SMF(Single Mode Fiber)의 백색광을 입사시키고 출력광을 CCD Camera로 광출력 모드를 검출하였다. 측정에 사용한 도파로의 선폭은 5 $\mu$ m이며 상부 클래딩은 실리콘을 사용하였다. 측정한 결과는 그림 8 (a)와 (b)이다. 단일모드와 다중모드의 차이를 말한다면 광도파로의 입력단에서 입력광의 정렬위치를 변화시켰을 때 출력광의 형태가 변형되면 다중모드 도파로이고 변형되지 않고 모드의 크기만 변하면 단일모드 도파로이다.

## 2.3 폴리머의 소재 개발

광 도파로용 폴리머 재료의 많은 물질 특성

요구 사항 중, 사용 파장에서의 낮은 광 진행 손실은 중요한 특성이다. 광 도파로의 전체 광 진행 손실은 물질 고유의 광 흡수, 폴리머 박막의 모폴로지에 기인한 광 산란, 그리고 외부 요인 (공정 부정확성, voids, crack, impurity 등)에 기인한다. 저 손실 재료 합성을 위해서는 분자 설계 단계에서부터 물질 고유의 흡수를 최소화할 수 있도록 해야 한다. 유기 물질의 고유광 손실은 적외선 진동 흡수(infrared vibrational absorption)에 기인한다. 일반적으로 유기 폴리머는 적외선 영역에서 분자 구조 내의 진동에 의한 고유의 흡수 영역을 가지고 있다. 특히, carbone-hydrogene (or O-H, N-H) 결합에 의한 근적외선 영역의 진동 흡수손실은 second 및 third harmonic overtone에 기인하는 것으로 광손실의 주된 원인이다. 이러한 손실 문제를 해결하기 위하여 C-H 결합을 C-F 결합으로 해결할 수 있다. 그 외 광손실의 주 원인으로 폴리머 박막 형성 시 생기는 모폴로지 형상에 크게 의존한다. 본 과제에서는 단일모드 및 다중모드에 적용 가능하면서 기존의 광폴리머 재료와 비슷한 광학적 열적 특성을 보이면서도 합성 및 양산이 용이한 신개념의 광경화 불소계 아크릴레이트의 개발을 목표로 하고 있다. 특히 과제에서 개발 하고자 하는 재료는 레이저 직접 묘화 시스템에서 반응하여 도파로 제작이 가능한 구조를 구현하고자 한다. 현재까지 개발한



그림 8. 형성된 도파로의 광모드 측정 결과

폴리머의 특성은 Slab 도파로의 광진행 손실을 측정된 결과 0.3dB/cm이었으며 1.45~1.47까지 연속적으로 굴절률을 제어하며 120°C 오븐에서 2,000시간동안 보관 시 필름의 굴절률이 안정하였으며, TGA 측정결과 300°C이상에서 안정하였다.

2.4 광소자 기반구조 제작

레이저 빔의 크기, 형태와 묘화 속도에 따라 광도파로의 형태가 달라지며 레이저 빔 형태에 따라 생성되는 광도파로 구조를 해석하고 단일 모드를 위한 광도파로 규격을 설정한다. 단일모드 광도파로 설계하기 위해 일반적으로 쓰이고 있는 유한차분법(Finite Difference Method, FDM)을 이용하였다. 코어 크기가 5μm × 5μm인 경우 기본 모드만 존재하며 코어 크기가 커지면 기본 모드와 1차 모드가 존재하므로 단일모드 광도파로를 구현하기 위해서는 코어 크기를 5μm × 5μm로 제한하여야 한다.

기반구조 제작을 위해서는 많은 응용구조의 기본이 되는 S-bend 도파로의 굽음 손실(Bending Loss)을 최소화하는 구조와 공정을 설계하고 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 광도파로와 다채널 광섬유의 결합을 고려하여 S-bend 높이를 125μm로 고정하고, 굽음 손실을 최소화 할 수 있는 최적의 곡률반경을 설계하였으며 그 결과는 그림 10에서 보여주고 있다. S-bend 도파로의 해석은 직선 도파로 사이에 S-bend 도파로가 결합되어 있는 형태의 구조를 형성하고 있는 BPM(Beam Propagation Method)에 의해 수행하였다. 클래드와 코어의 굴절률차가 0.75 %이며, 코어의 크기가 5μm × 5μm인 S-bend 도파로일 경우 도파로의 굽음 손실을 BPM으로 해석한 것은 그림 11이며 실제로 굽음 손실을 측정된 것이며, 그 결과 최적의 S-bend 곡률반경은 5,500μm이며 굽음 손실은 0.143dB로 나타났다.

그림 12는 설계한 S-bend 도파로를 레이저 직접묘화 방법으로 기초 실험한 것이다.

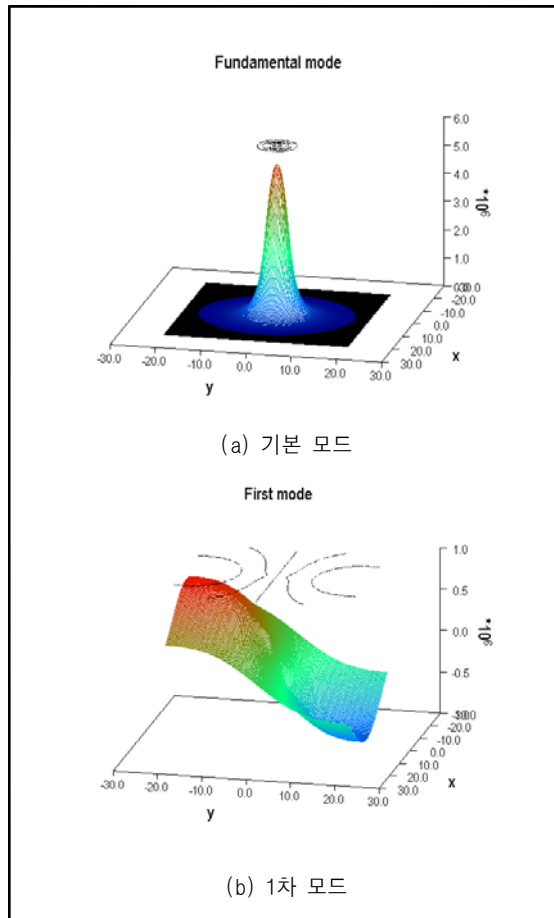


그림 9. 도파로의 Eigen Mode(코어 크기:5μm × 5μm)

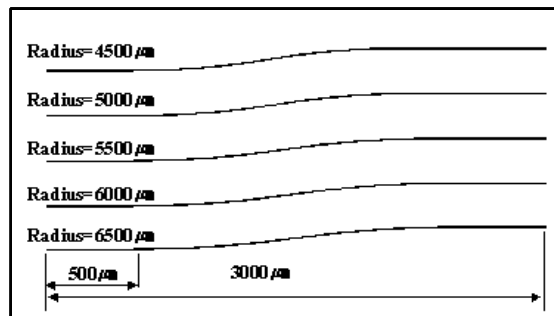


그림 10. S-bend 도파로의 설계

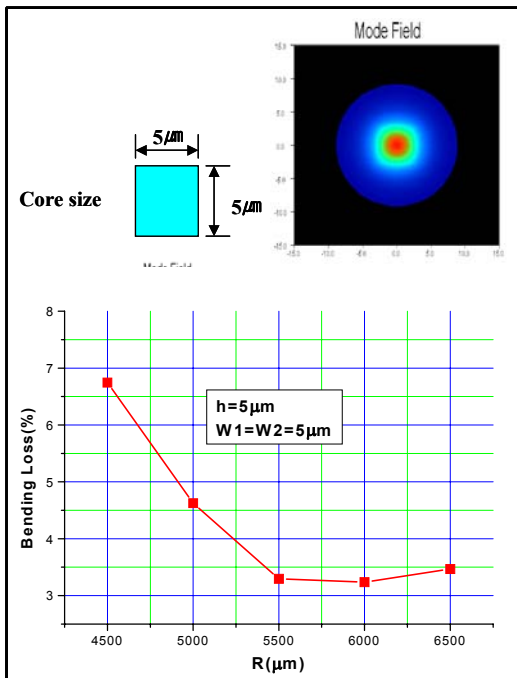


그림 11. 코어( $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ )가 정사각형 형태인 S-bend 도파로의 굽음 손실

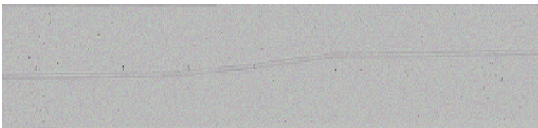


그림 12. 단일모드 S-bend 도파로 제작

### 3. 결론

레이저 직접 묘화방법을 이용하여 광도파로를 제작하였다. UV 영역의 레이저를 사용하여 폴리머 위에 직접 묘화하는 방법을 이용하여 광도파로 제작을 하였다.

실험에서 사용한 레이저는 각각 DPSS(355nm), Ar ion(cw, 336~363.8 nm)이었으며 각 시스템은 레이저 직접묘화를 위해 구성하였다. 광학용 폴리머의 레이저 빔 조사 시 폴리머의 굴절률을 변화시킬 수 있는 결상식 방법을 사용하여 도파로를 제작하였다.

DPSS 레이저 시스템을 이용하여 제작된 도파

로의 크기는 선폭과 높이가 각각  $27.6\mu\text{m}$ 와  $5.7\mu\text{m}$ 이었다. Ar ion 레이저 시스템인 경우 선폭  $29\mu\text{m}$ 와 높이  $6.4\mu\text{m}$ 이었으며, 대물렌즈를 사용하였을 경우는 선폭  $2\sim 4.5\mu\text{m}$ , 높이  $6.4\mu\text{m}$ 이었으며 도파로의 출력과 모드 검출을 한 결과 단일모드로 도파되는 것을 확인할 수 있었다. 도파로 형상의 크기는 대물렌즈를 사용하여 레이저 빔을 조사시키면 가능하다. 기반구조 제작 시 응용구조의 기본이 S-bend 도파로를 제작하기 위해 굽음 손실을 최소화하는 구조와 공정을 설계하고 BPM 시뮬레이션을 통해 하였다. 정사각형의 코어 크기가  $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ 일 때, 최적의 굽음 반경  $5,500\mu\text{m}$ 이며 굽음 손실인  $0.143\text{ dB}$ 로 나타났다. 이러한 S-bend 구조, 설계 및 시뮬레이션을 통해 기초실험을 하였다.

### 참고 문헌

- [1] W. H. Wong, J. Zhou and E. Y. Pun, "Low-loss polymeric optical waveguide using electron-beam direct writing", Applied Physics Letters, Vol 78, No. 15, pp. 2110-2112, 2001
- [2] W. H. Wong and E. Y. Pun, "Polymeric waveguide wavelength filters using electron-beam direct writing," Applied Physics Letters, Vol 79, No. 22, pp. 3576-3578, 2001
- [3] Chan Y. C., Lam Y. L., Zhou Y, Xu F. L., Liaw C. Y. Jiang W. and Ahn J. S, "Development and Application of Laser Writing Lithography System for Maskless Patterning," Optical Engineering, Vol. 37, No. 9, pp.2521-2530, 1998.
- [4] Schaper C. D., Kailath T., EL-Awady K. and Tay A., "Application of Control and Signal Processing to the Microlithography Process," Proceeding of the 1999



- IEEE 25th Annual Conference of The IEEE Industrial Electronics Society, Vol. 1 V.1, 1999.
- [5] Äyräas P., Jabbour G. E., Honkanen S. and Peyghambarian N, "Self-aligned Photo-resist Patterning for Integrated Optics," Optical Engineering, Vol. 39, No. 2, pp. 575-576, 2000.
- [6] Baumann B. and Bargon J., "Conducting polymer pattern via Laser Processing," Applied Surface Science 106 pp. 287-292, 1996.
- [7] Witzgall G., Vrijen R. and Yablonovitch E., "Single-shot Two-photon exposure of Commercial Photoresist for the production of Three-dimensional Structures," Optics Letters, Vol. 23, No. 22, pp.1745-1747, 1998.
- [8] Saint Christophe E., Frémont H. N'kaoua G. and Danto Y., Application of the Theoretical Model for Line Width Control in Photoresists Sensitized by a Laser Beam," Electronics Letters, Vol. 33, No. 12, pp.1049-1051, 1997.
- [9] Arnone C, "The Laser-plotter : A Versatile Lithographic Tool for Integrated Optics and Microelectronics," Microelectronic Engineering, Vol. 17, pp. 483-486, 1992.
- [10] Von Gutfeld R. J., Gelchinski M. H. and Romankiw L. T., "Maskless Laser Patterning for Gold Plating of Microelectronic Materials," J. Electrochem.Soc., Vol. 130, No. 9, pp.1840-1844, 1983.
- [11] Hirayuki O., "Photoresit for PDP," Electronic Parts and Materials, Vol. 37, No. 2, pp.45-48, 19