



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](#)

공학석사 학위논문

광 스캐너용 유리 프레넬
마이크로렌즈의 설계 및 제작

Design and Fabrication of Glass Fresnel
Microlens for Optical Scanner

2018 년 8 월

서울대학교 대학원

전기 정보 공학부

정 민 수

광 스캐너용 유리 프레넬 마이크로렌즈의 설계 및 제작

지도 교수 김 용 권

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함
2018 년 8 월

서울대학교 대학원
전기 정보 공학부
정 민 수

정민수의 공학석사 학위논문을 인준함
2018 년 8 월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

초 록

본 연구는 유리 재흐름 공정을 통해 실리콘 기판에 미리 결합된 광 스캐너용 유리 프레넬 마이크로렌즈를 제작하는 새로운 방법을 설명한다. 제작된 유리 프레넬 마이크로렌즈가 실리콘 기판에 미리 결합되어있기 때문에 추가적인 수작업 없이 반도체 미세공정을 통해 구동부와 결합이 가능하다. 프레넬 렌즈의 얇고 가벼운 구조적 특징 덕분에 렌즈의 크기가 크며 빠른 구동 속도를 가지는 광 스캐너를 설계할 수 있다. 또한, 기존 구면렌즈와 비교해 초점거리를 짧게 설계할 수 있으며 설계 자유도가 높다. 본 연구에서는 반도체 미세공정을 통한 유리 프레넬 마이크로렌즈를 학계 최초로 제작하였으며 마이크로스캐너와 결합하여 구동에 성공하였다.

제작된 유리 프레넬 마이크로렌즈는 3개의 유리 동심원으로 구성되어 있으며 1.4 mm의 지름을 가진다. 평균 표면거칠기는 36 nm로 측정되었다. 동일 곡률반경과 지름을 가지는 구면렌즈와 비교해 24 %의 부피와 42.4%의 두께를 가져 경량화에 성공하였다. 유리 동심원의 수의 증가를 통해 부피와 두께를 더욱 크게 감소시킬 수 있다. 마이크로스캐너는 4개의 folded-beam 스프링에 지지되어 있으며 중심에 프레넬 마이크로렌즈가 위치한다.

대기압에서 측정된 광 스캐너의 공진주파수는 1.292 kHz이며 Q값은 107.7로 측정되었다. 17.5 V 직류 바이어스 전압과 17.5 V 진폭의 교류 입력을 인가한 결과 $\pm 50 \mu\text{m}$ 이상의 큰 횡 방향 변위를 구동했다. 광학 스캔의 시연을 통해 $\pm 1.20^\circ$ 의 레이저 조향 각도가 측정되었다.

제작된 프레넬 마이크로렌즈 스캐너는 지름이 1 mm 이상의 유리 마이크로렌즈가 사용된 광 스캐너 중 가장 빠른 구동 속도를 달성하였으며 대면적 마이크로렌즈 경량화의 새로운 해결 방법이 될

것이다. 또한, 유리 열 재흐름 공정을 통한 프레넬 마이크로렌즈와 같은 비대칭 구조를 제작하는 방법은 보다 복잡한 구조물을 제작하는 데 활용될 수 있다.

주요어 : 프레넬 마이크로렌즈, 유리 열 재흐름, 광 스캐너
학 번 : 2016-23836

목 차

제 1 장 서 론	1
1.1 연구의 배경	1
1.2 연구의 동기	3
1.3 연구의 목적	5
1.4 논문의 구성	5
제 2 장 설 계	6
2.1 프레넬 마이크로렌즈 설계	6
2.2 마이크로 스캐너 설계	13
제 3 장 제 작	19
3.1 전체 공정 과정	19
3.2 프레넬 마이크로렌즈공정 결과.....	26
3.3 마이크로스캐너 공정 결과	31
제 4 장 측 정	34
4.1 PCB 제작 및 소자와 결합.....	34
4.2 동적 응답 측정	35
4.3 내열성 평가	40
4.4 광학 측정.....	42
제 5 장 결 론	44
참고문헌.....	45
Abstract	47

그림 목차

[그림 1.1] 프레넬 마이크로렌즈의 다양한 제작방법	4
[그림 2.1] 구면렌즈와 프레넬 렌즈.....	6
[그림 2.2] 제안된 프레넬 마이크로렌즈의 조감도	7
[그림 2.3] 프레넬 마이크로렌즈의 평면도(a), 단면도(b)	7
[그림 2.4] 구면의 부분곡면 적층을 통한 프레넬 렌즈 설계.....	10
[그림 2.5] 유리 부피 조절을 통한 프레넬 마이크로렌즈 설계.....	10
[그림 2.6] 굴절렌즈를 이용한 빛 조향의 원리.....	13
[그림 2.7] 제안된 소자의 전반적인 조감도	14
[그림 2.8] 측면 정전 구동 공진기의 개략도.....	15
[그림 2.9] 1차모드 공진구동 COMSOL 시뮬레이션 결과	17
[그림 2.10] 2~5차 모드 공진구동 COMSOL 시뮬레이션 결과	18
[그림 3.1] 유리 프레넬 마이크로렌즈 공정 과정	23
[그림 3.2] 유리 프레넬 마이크로가 결합된 광스캐너의 공정 과정..	25
[그림 3.3] 제작된 실리콘 몰드의 SEM 사진	26
[그림 3.4] 실리콘 몰드의 하부가 일부 미 관통된 광학 사진	27
[그림 3.5] 열 재흐름 공정 (a)전 · (b)후의 유리 원기둥과 프레넬 마이크로렌즈의 SEM 사진.....	28
[그림 3.6] 프레넬 마이크로렌즈 3D 프로파일러 측정 이미지	29
[그림 3.7] 측정된 프레넬 마이크로렌즈의 표면 프로파일.....	29
[그림 3.8] 측정된 프레넬 마이크로렌즈의 표면 거칠기.....	30
[그림 3.9] 완성된 소자의 SEM 사진.....	31
[그림 3.10] 완성된 소자의 광학 사진	31
[그림 3.11] 스프링 SEM 사진	32
[그림 4.1] 제작된 PCB에 결합된 소자	34
[그림 4.2] 실험 측정 장비 구성	35
[그림 4.3] 스캐너의 측정된 주파수 응답(샘플 1)	37
[그림 4.4] 인가 된 교류 전압의 함수로서 측정 된 공진시 측 방향 변위 (샘플 1).....	39
[그림 4.5] 가열 전 · 후 구동 변위 변화.....	41
[그림 4.6] 광학 측정 장비 구성	43
[그림 4.7] 광학 시스템의 구성도.....	43
[그림 4.8] 스캔 라인의 광학 이미지	43

표 목차

[표 2-1] 프레넬 마이크로렌즈의 설계사양 요약.....	12
[표 2-2] 마이크로스캐너의 설계사양 요약	16
[표 3-1] AZ4330 감광제의 공정조건	19
[표 3-2] 측정된 프레넬 마이크로렌즈의 프로파일 요약	30
[표 3-3] 제작된 스캐너의 스프링 치수.....	33
[표 3-4] 측정된 치수에 따른 예상되는 스캐너의 공진주파수.....	33
[표 4-1] 샘플 간 공진 주파수 균일성 측정 데이터	37
[표 4-2] 샘플 횡변위 균일성 측정 데이터	39

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경

자동차 배광 가변형 전조등 시스템(AFLS, adaptive front-lighting system, 이하 AFLS)는 도로, 기후조건 등 주행상황의 변화에 따라 운전자의 시야를 최대한 확보해주기 위한 지능형 전조등 시스템을 말한다. 전조등의 상하좌우 움직임은 조절하며 지형 및 기후 등을 고려하여 주행상황에 맞는 빛의 형태를 구현해 운전자의 가시성 및 안정성을 크게 향상시킬 수 있다.

AFLS의 국내외 연구현황으로 스텝 모터 기반의 소형 구동부를 구성하여 전조등 자체를 회전시키는 방법과 Matrix LED형태로 배열 구성을 통해 원하는 구간만 비추는 방법이 연구되고있다. 스텝 모터 기반의 AFLS는 전조등 전체를 회전시키기 때문에 조향범위가 몇가지 모드로 한정되어 다양한 기능을 수행하기 어렵다. 또한, 조향속도가 매우 느려 고속 주행 중 특이점 포착 및 집광 등 속도가 빠른 기능을 구현하기 어렵다. 현재 개발된 Matrix LED는 1열로 구성되어 운전자의 시야를 2차원 공간으로 구분하여 조사하는 한계점이 있다.

본 연구에서, MEMS(Micro-Electro-Mechanical System) 기술을 기존의 AFLS에 적용하여 발생하는 한계를 해결하고자 한다. MEMS 기술을 이용한 소형화된 전기·전자소자 제작 기술은 대형 광학 구성요소를 대체하고 있다. 일반적으로 대형 광학 구성 요소는 중량이 크고 비싸며 신뢰도가 낮다. MEMS 기술을 이용하면 저비용, 작은 크기와 무게, 빠른 동작 속도 그리고 저전력의 소자를 구현할 수 있다. 이러한 MEMS 기술은 광학 스캐너에도 적용되어 많은 분야에 응용되고 있다.

광학 스캐너 중 MEMS 기술을 통해 제작된 수 mm 크기의 스캐너는 마이크로스캐너로 구분된다. 이 중 입사광의 방향에 대한

마이크로렌즈의 횡 방향 운동을 이용하여 빛을 굴절시키는 스캐너를 마이크로렌즈 스캐너라 한다. 반도체 미세가공을 이용한 마이크로렌즈 스캐너는 광해상도, 2축 스캐닝의 구현, 전력 소비 효율, 구동 속도 등 스캐너의 기본적인 성능을 결정하는 요소에서 기존의 대형 스캐너보다 뛰어나다.

오늘날까지, 많은 연구그룹이 마이크로렌즈 스캐너를 연구하고 제작하였다. 대표적으로 기계적으로 가공된 유리 렌즈를 마이크로 스캐너에 결합하는 방식[1-3]과 액체 물방울을 주입하는 방식[4-5]을 이용하여 제작하였다. 하지만 기계가공된 유리 렌즈는 실리콘으로 가공된 구동부에 비해 상대적으로 무거워 빠른 속도를 가지기 어렵다. 액체 방울을 주입하는 방법은 폴리머의 양을 정확히 조절하기 어렵기 때문에 렌즈 특성을 정밀하게 설계하기 어렵다. 또한, 위의 방법 모두 근본적으로 복잡하고 어려운 렌즈와 구동부를 결합해야 하며 제조 정확도 및 정렬에 한계를 가지고 있다. 유리 열 재흐름 공정을 통한 유리 마이크로렌즈가 미리 결합된 소자를 제작하여 위의 문제들을 해결하였다[6]. 하지만 제안된 방법들은 대면적 마이크로렌즈를 적용하는데 한계가 있다. 마이크로렌즈의 크기가 커지면 광원의 빛을 처리할 때 높은 광 효율을 기대할 수 있지만, 스캐너의 구동 속도 감소와 구동 전압의 증가가 수반된다. 이를 최소화하기 위해 대면적 마이크로렌즈의 경량화 방법 개발이 필요하다.

1.2 연구의 동기

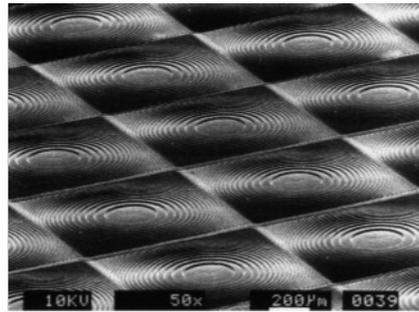
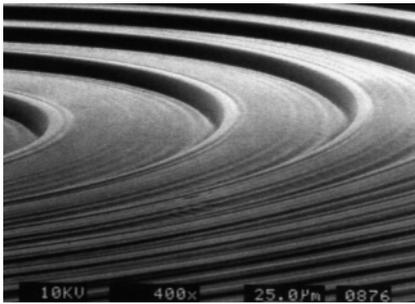
프레넬 마이크로렌즈를 활용하면 대면적 마이크로렌즈의 경량화가 가능하다. 프레넬 마이크로렌즈는 기존의 구면 마이크로렌즈와 비교해 월등히 얇고 가벼운 구조적 특성을 가지고있다. 따라서 프레넬 마이크로렌즈를 마이크로스캐너에 적용 시 스캐너의 구동 속도 감소 및 구동 전압의 증가 없이 대면적 마이크로렌즈의 경량화를 달성할 수 있다.

기존의 프레넬 마이크로렌즈를 제작하는 대표적인 방법으로는 미리 기계적으로 제작된 구조물에 렌즈를 본뜨는 방법이다[7]. 하지만 위의 방법은 마이크로스캐너와 결합 시 추가적인 수작업이 필요하며 정확한 정렬에 어려움이 있다. 그레이-톤 포토리소그래피 공정 방법[8]와 집속 이온 빔 노광 공정 방법[9]은 웨이퍼-단위 공정이 가능하다. 하지만, 그레이-톤 포토리소그래피를 이용한 제작 방법은 특별하게 인코딩된 포토리소그래피 패턴을 필요로 하며 비용을 크게 증가시킨다. 또한, 집속 이온 빔 노광을 이용한 제작은 광학 품질의 표면 형상으로 구현하는데 어려움이 있다.

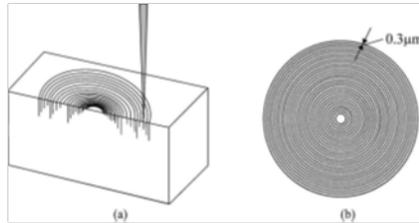
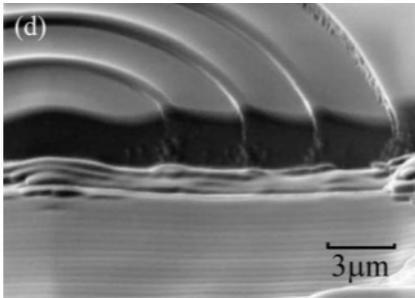
따라서, 본 논문에서는 위의 기술적인 문제를 해결하기 위해 유리 열 재흐름 공정을 이용한 프레넬 마이크로렌즈의 새로운 설계 및 제작법을 제안한다. 여러 개의 개구부를 갖는 실리콘 구조물에 두 번의 유리 열 재흐름 공정을 통하여 프레넬 마이크로렌즈는 실리콘 기판에 직접 제작된다. 따라서 추가적인 수작업이 필요 없으며 웨이퍼-단위의 대량생산이 가능하다. 또한, 표면장력 기반의 제작 방식은 위의 다른 제작 방법과 비교해 높은 표면 품질을 나타낸다. 기존에 없는 여러 개의 서로 다른 개구부를 갖는 실리콘 몰드에서 열 재흐름 공정을 이용하는 제안 된 접근법은 보다 복잡한 광학 장치를 제조하는 데 잠재적으로 이용 될 수 있다.



(a) 틀 금형 및 복제 [7]



(b) 그레이-톤 포토리소그래피 [8]



(c) 이온 빔 노광 공정 [9]

그림 1.1 프레넬 마이크로렌즈의 다양한 제작방법

1.3 연구의 목적

본 연구의 첫 번째 목적은 유리 열 재흐름 공정을 통해 기존에 없는 프레넬 마이크로렌즈의 제작 방법을 제안하고, 대면적 마이크로렌즈의 광 스캐너에 적용에 대한 한계를 해결하는 것이다.

또한, 최종 목적은 제안된 유리 프레넬 마이크로렌즈를 웨이퍼-단위 공정을 통해 광 스캐너에 적용하여 광스캐너에 응용 가능성을 입증하는 것이다.

1.4 논문의 구성

1 장은 연구의 배경, 동기 그리고 목적을 다룬다. 2 장은 프레넬 마이크로렌즈와 마이크로스캐너의 설계를 상세히 설명한다. 유리 재흐름 공정을 통한 프레넬 마이크로렌즈와 횡방향 마이크로스캐너의 성능 요구 사항을 정의한다. 3 장은 프레넬 마이크로렌즈와 마이크로스캐너의 제조 과정과 결과를 상세히 설명한다. 유리 재흐름 공정을 통해 기존에 없는 새로운 방법으로 프레넬 마이크로렌즈를 제작하였다. 4 장은 완성된 소자의 실험 측정 결과를 보여준다. 동적 구동 및 광학 측정이 수행되었다. 마지막으로, 6 장에서 연구의 결론을 서술한다.

제 2 장 설 계

2.1 프레넬 마이크로렌즈 설계

2.1.1 이론 : 프레넬 렌즈

프레넬 마이크로렌즈는 마이크로미터 크기의 구조를 갖는 프레넬 렌즈로써 기존의 볼록렌즈를 동심원 환형 부분들로 분할하여, 환형 구조가 반복되어 있는 형태이다. 넓은 개구부와 짧은 초점거리 특성을 갖는 반면 같은 특성의 구면 렌즈의 경우보다 부피가 매우 작고 두께가 얇다. 그림 2.1과 같이 전통적인 볼록렌즈의 부분으로 형성된 수많은 동심원으로 구성되어 있다.

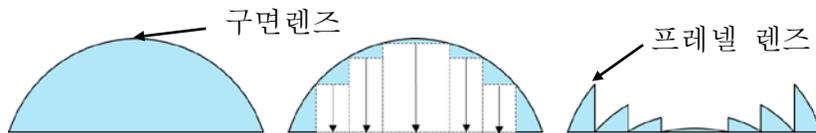


그림 2.1 구면렌즈와 프레넬 렌즈

2.1.2 전반적인 설계

본 연구의 유리 프레넬 마이크로렌즈는 그림 2.2에 묘사되어있듯이 3개의 구역의 유리 동심 환형으로 구성되어 있다. 그림 2.3에서 보이는 바와 같이 실리콘 고리 모양 구조체는 점성 유리가 렌즈 아래의 모든 곳에서 연결되도록 하부가 관통되어 있으며 원형 구조물로 지지되어 있다.

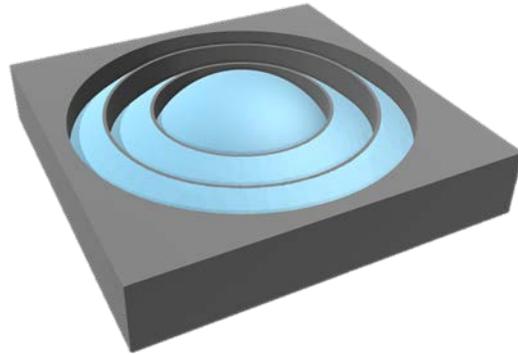


그림 2.2 제안된 프레넬 마이크로렌즈의 조감도

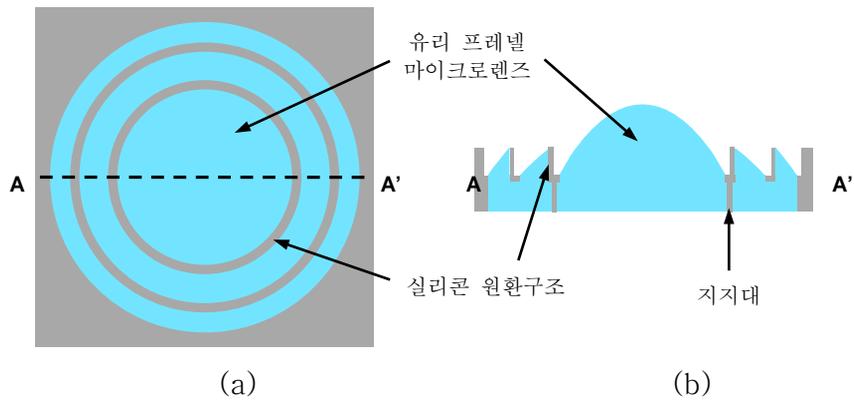


그림 2.3 프레넬 마이크로렌즈의 평면도(a), 단면도(b)

본 논문의 유리 프레넬 마이크로렌즈는 열 재흐름 공정을 통해 제작되기 때문에, 설계 및 제작 방법은 아래의 두 가정을 기반으로 한다.

가정 1: 열 재흐름 공정 전후 유리의 부피는 일정하다.

가정 2: 실리콘-유리 계면의 유속은 0 이다. 따라서, 실리콘 격벽의 유리가 흘러내리지 않는다.

이때, 독립적으로 분리되어 있지 않은 유체가 여러 개구부를 갖는 실리콘 몰드 안에 열적으로 녹은 유리의 표면은 표면 에너지 최소화를 위해 동일한 곡률반지름을 갖는다[10]. 따라서 열적으로 녹은 유리들은 동일한 곡률 반지름을 형성하며 프레넬 마이크로렌즈가 제작된다.

프레넬 렌즈는 다양한 방법으로 설계가 가능하다. 본 연구에서는 CMP 공정을 통하여 실리콘 림의 두께를 정하기 때문에 그림 2.4와 같이 중앙 렌즈를 제외하고 동일한 높이(T)를 가지도록 설계하였다. 또한 동일한 실리콘 원환 구조의 폭(g)을 가지도록 디자인 규칙을 정하였다.

유리 프레넬 마이크로렌즈의 상세한 설계는 그림 2.4와 그림 2.5와 같이 유리 부피 조절을 통해 하였다. 프레넬 마이크로렌즈로 제작하고자 하는 구면렌즈의 기하학적 변수인 곡률반지름(R_c)와 반지름(r)을 설정하였다. 다음으로 프레넬 렌즈의 존의 수(n), 실리콘 림의 두께(T)와 간극(g)를 설정한다. 이에 따라 각 존의 렌즈의 폭(x_n)이 결정된다. 설정된 변수들을 기반으로 설계하려는 프레넬 마이크로렌즈의 부피를 예측할 수 있고 이 값과 동일한 값을 가지도록($C_{n0} + C_{n1} + C_{n2} = Z_{n0} + Z_{n1} + Z_{n2}$) 열 재흐름 전의 중심 존의 원기둥 높이(T_{n0})를 조절한다. 본 연구에서는 공정의 용이성을 위해서 중심 존의 원기둥 높이(T_{n0})를 실리콘 림의 두께(T)와 동일한 값을 가지도록 하였다.

이 때, 열 재흐름 전 원기둥 유리의 부피(C_{n0} , C_{n1} , C_{n2})는 다음의 식에 의해 구해진다.

$$C_{n0} = \pi(x_1)^2 T_{n0} \quad (2.1)$$

$$C_{n1} = \pi\{(x_2)^2 - (x_1 + g)^2\}T \quad (2.2)$$

$$C_{n2} = \pi\{(x_3)^2 - (x_2 + g)^2\}T \quad (2.3)$$

열 재흐름 후 프레넬 마이크로렌즈의 부피(Z_{n0} , Z_{n1} , Z_{n2})는 다음의 식에 의해 구해진다.

$$Z_{n0} = \frac{\pi(R_c - \sqrt{R_c^2 - x_1^2})}{6} \left\{ 3(x_1)^2 + \left(R_c - \sqrt{R_c^2 - x_1^2} \right)^2 \right\} \quad (2.4)$$

$$Z_{n1} = \frac{\pi(T)}{6} \{ 3(x_2)^2 + 3((x_1 + g))^2 + (T)^2 \} - \pi(x_1 + g)^2(T) \quad (2.5)$$

$$Z_{n2} = \frac{\pi(T)}{6} \{ 3(x_3)^2 + 3((x_2 + g))^2 + (T)^2 \} - \pi(x_2 + g)^2(T) \quad (2.6)$$

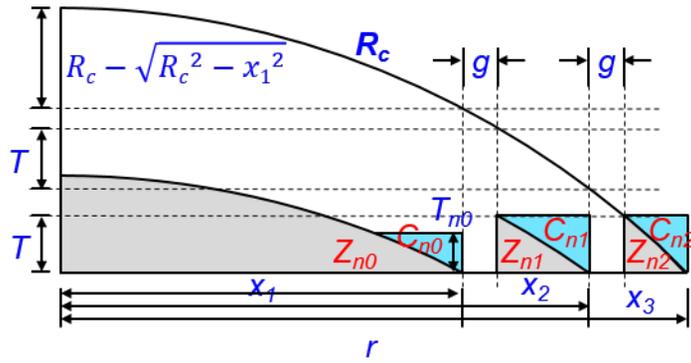
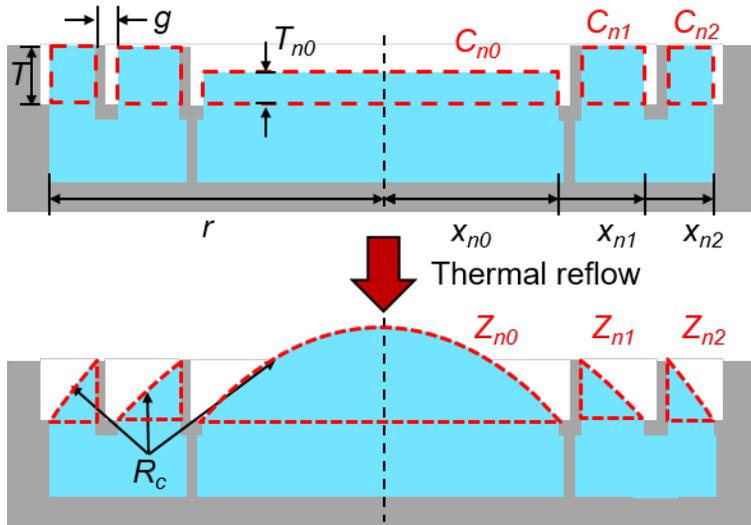


그림 2.4 구면의 부분곡면 적층을 통한 프레넬 렌즈 설계



- | | |
|---|---------------------------------|
| R_c : radius of curvature | g : si rim width |
| r : radius of the Fresnel microlens | x_n : width of each zone lens |
| T : glass cylinder height | C_n : cylinder volume |
| T_{n0} : center glass cylinder height | Z_n : lens volume |

그림 2.5 유리 부피 조절을 통한 프레넬 마이크로렌즈 설계

2.1.3 중력의 영향성 고려

일반적으로, 대부분의 열 재흐름 공정을 통한 마이크로렌즈는 1 mm 미만의 직경을 갖는다. 열 재흐름 공정을 통한 마이크로렌즈 제작에 주요한 매개 변수는 표면장력과 중력이다. μm 치수의 지름을 가지는 마이크로렌즈 제작에서는 표면장력이 주요한 변수이며 중력은 무시가능하다. 하지만 마이크로렌즈의 지름이 커지면 중력에 의한 영향성이 커지게 되며 설계에 영향을 미친다. 감광제(photoresist)를 이용한 마이크로렌즈 제작에서 지경이 1 mm 이상일 경우 중력이 렌즈의 프로파일 형태에 중대한 영향을 미치기 시작한다고 보고하였다[11]. 중력과 표면장력의 상대적 중요성은 다음의 수식으로 비교가능하다[12]. 특성 치수가 D 인 유체의 표면장력에 의한 작업은 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\Delta S = D^2 \gamma \quad (2.7)$$

여기서 γ 는 표면장력(N/m)이다. 그리고 중력에 의한 작업은 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\Delta G = D^4 \rho g \quad (2.8)$$

여기서 ρ 는 밀도(kg/m^3) 그리고 g 는 중력가속도(m/s^2)이다. 따라서, 중력과 표면장력의 상대적 중요성은 다음과 같이 정의된 수식을 사용하여 비교할수있다.

$$Sg = \frac{\Delta S}{\Delta G} = \frac{\gamma}{D^2 \rho g} \quad (2.9)$$

결국 직경이 10 μm 경우 Sg 는 10^5 의 차수를 가져 중력의 영향성을 무시할 수 있다. 하지만 중력의 상대적 영향성은 직경의 제곱에 비례하며 mm 단위의 마이크로렌즈 설계에서 중력을 고려해야하며 설계에 어려움이 따른다. 따라서 본 논문의 유리 프레넬 마이크로 렌즈 설계에 있어 중력의 영향성을 배제하기위해 가장 큰 면적의 직경을 1 mm 이하로 설계하여 타당성을 부여하였다.

2.1.4 세부디자인

제안된 유리 프레넬 마이크로렌즈의 세부적인 설계사양이 아래 표 2-1에 요약 되어있다. 1400 μm 의 지름을 가지는 프레넬 마이크로렌즈는 3개의 유리 동심원으로 구성되어있다. 설계된 프레넬 마이크로렌즈는 동일한 곡률반경과 지름을 가지는 구형렌즈에 비해 부피는 약 24% 그리고 렌즈의 두께는 42.4 %를 가진다.

표 2-1 프레넬 마이크로렌즈의 설계사양 요약

Parameter	Value	Unit
Radius of curvature of the Fresnel microlens	962.7	μm
Diameter of the Fresnel microlens	1400	μm
Total number of Fresnel lens zones	3	-
Glass cylinder height	50	μm
Microlens height	128	μm
Focal length	2040	μm
Refractive index of Borofloat33 [®]	1.472	-
Numerical aperture (NA)	0.453	-

2.2 마이크로스캐너 설계

2.2.1 전반적인 설계

본 연구의 마이크로스캐너는 굴절렌즈를 이용한 빛의 조향이 이루어진다. 기하 광학의 원리는 그림 2.6에 묘사되어있다. 렌즈의 초점거리로부터 빛이 인가될 때, 빛이 평행하게 진행한다. 하지만, 렌즈가 중앙으로부터 벗어나면 빛 또한 동일한 방향으로 이동하게 된다. 본 논문에서 제안하는 마이크로스캐너 또한 위의 원리를 이용하여 빛을 조향한다.

제안된 유리 프레넬 마이크로렌즈가 일체형으로 집적된 2차원 마이크로스캐너의 전반적인 조감도가 그림 2.7에 묘사되어있다. 유리 프레넬 마이크로렌즈는 소자 중앙에 위치해있으며 X-축 구동을 위한 4개의 folded-beam 스프링에 의하여 지지되어 있다.

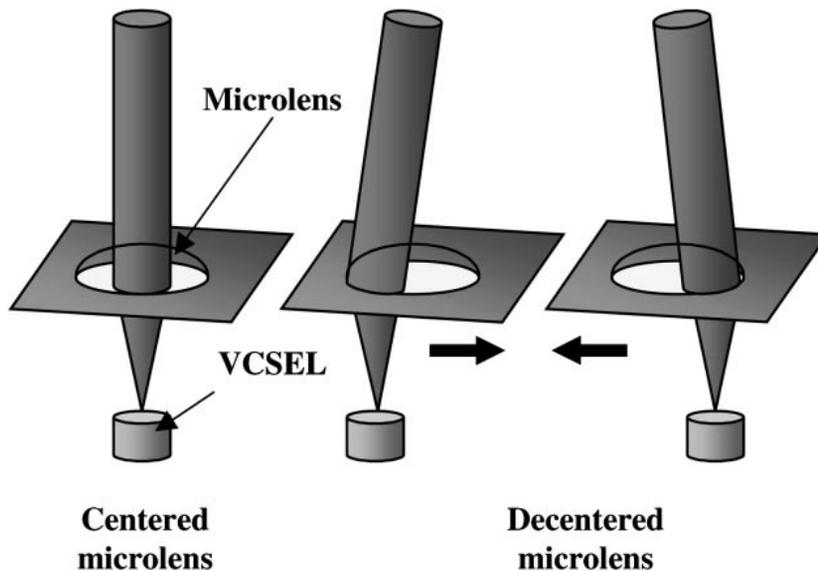


그림 2.6 굴절렌즈를 이용한 빛 조향의 원리 [13].

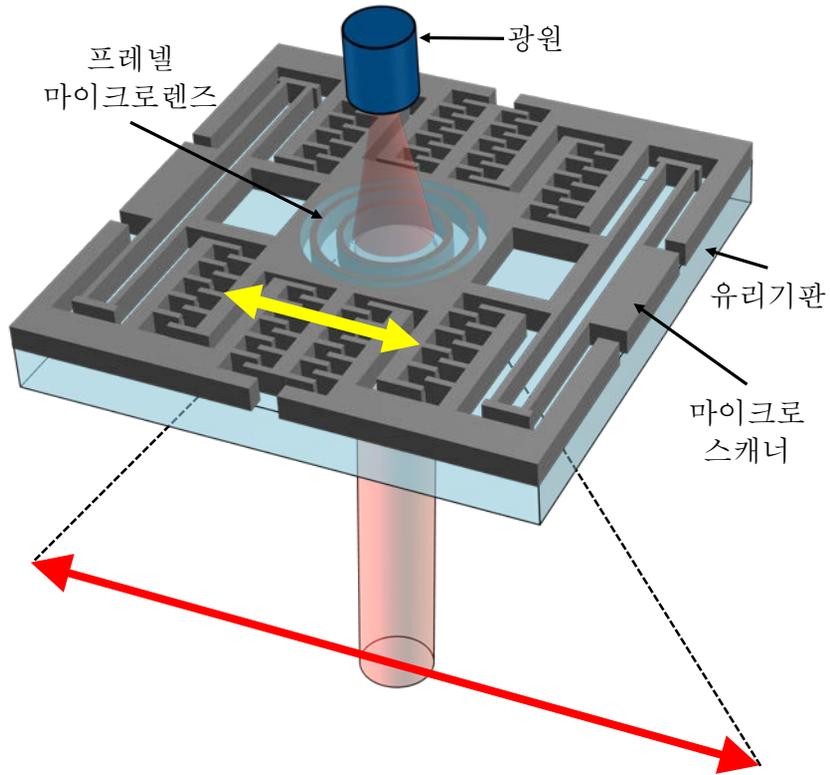


그림 2.7 제안된 소자의 전반적인 조감도

2.2.2 상세 디자인

제안된 마이크로스캐너는 그림 2.8와 같이 구동부와 고정부로 구성되어있다. 이때 구동부를 움직이게 하는 스프링 상수, 공진주파수 그리고 공진 시 평행 구동 거리를 다음의 식에 의해 예측할 수 있다.

이러한 이론과 문헌조사를 통해 스캐너를 설계하였다. 1 kHz 이상의 빠른 구동속도를 위해 공진주파수를 1.6 kHz로 설계하였다. 설계 세부사항은 아래 표 2-2에 기입하였다.

표 2-2 마이크로스캐너의 설계사양 요약

	Objective	Value	Unit
Die size	< 4 mm, in diameter	4.00 × 3.70	mm ²
Lateral displacement	Large displacement > ±40 μm	±50	μm
Resonant frequency	High speed > 1 kHz	1.60	kHz
Effective mass	-	6.52E-7	kg
Effective spring constant	-	65.84	N/m
Structure height	-	60	μm
Number of comb finger	-	660	EA
Comb gap	-	4.0	μm
Assumed Q-factor	-	100	
$V_{bias} \times V_{AC}$ (±50 μm displacement)		93.9	V ²

2.2.3 공진주파수 시뮬레이션

공진주파수 검증을 위해 COMSOL Multiphysics를 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 결과는 그림 2.9에 나타내었다. 도출된 공진주파수는 각각 1.597 kHz (1st 모드)가 도출되었으며 설계값인 1.6 kHz와 0.188 %의 오차를 나타내었다. 2nd 모드는 4.173 kHz로 1st 모드와 충분한 격리가 이뤄졌다. 콤팩트 지지대의 길이가 1 mm 이상일 때 2nd 모드와 간섭이 발생하였기 때문에 설계에 반영하였다.

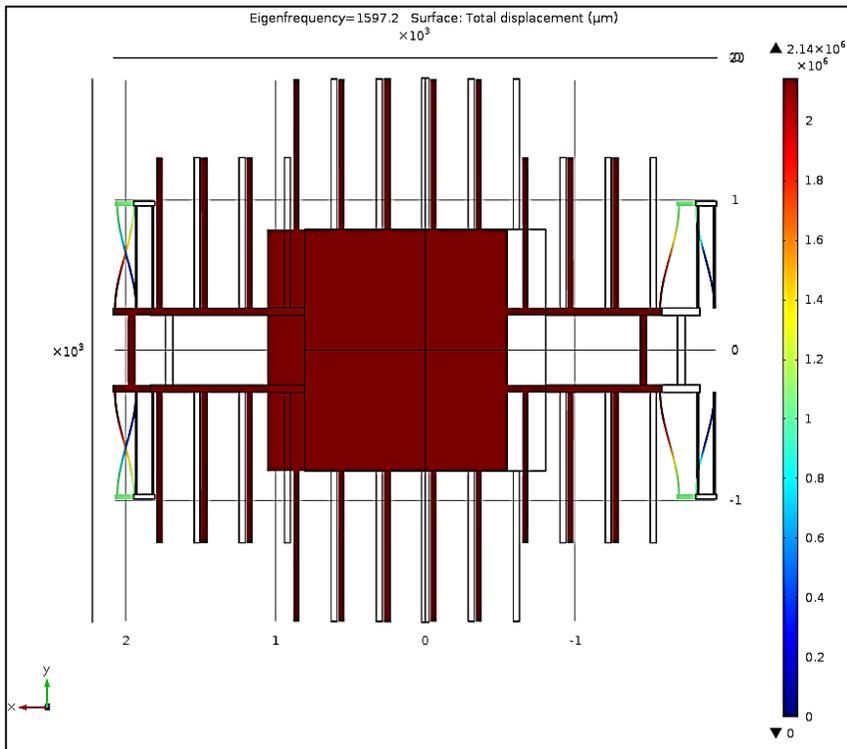
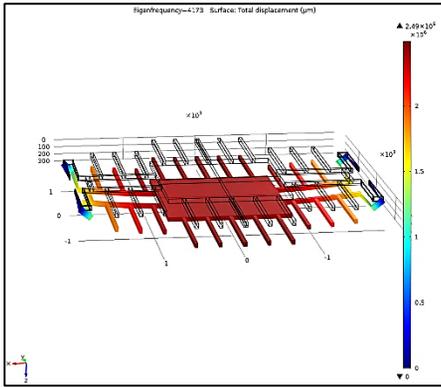
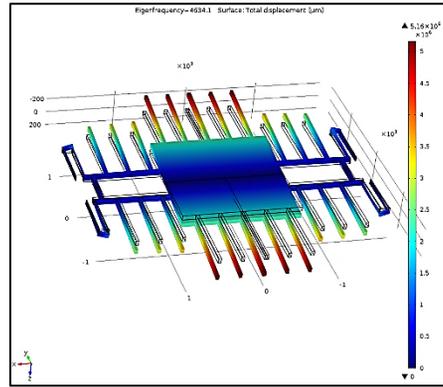


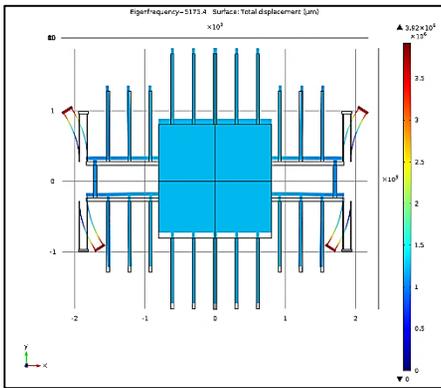
그림 2.9 1차모드 공진구동 COMSOL 시뮬레이션 결과



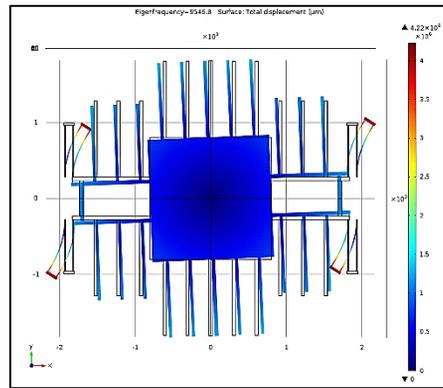
(a) 2nd Mode - 4.173 kHz



(b) 3rd Mode - 4.634 kHz



(c) 4th Mode - 5.175 kHz



(d) 5th Mode - 9.546 kHz

그림 2.10 2~5차 모드 공진구동 COMSOL 시뮬레이션 결과

제 3 장 제 작

3.1 전체 공정 과정

3.1.1 전반적인 공정 과정

본 연구에서 제작된 소자는 크게 프레넬 마이크로렌즈가 형성되는 공정과 마이크로스캐너가 릴리즈 되는 공정으로 나뉜다. 두 번의 열 재흐름 공정을 통하여 프레넬 마이크로렌즈는 실리콘 기판에 제작된다. 습식 식각된 유리 기판을 제작된 프레넬 마이크로렌즈가 형성된 기판과 양극 접합 공정 후 이온 식각 공정을 통해 릴리즈되어 소자가 완성된다. 본 연구의 모든 포토 공정은 AZ4330 감광제를 이용하였으며 5.2 μm 를 도포하였다. 공정조건은 표 3.1과 같다.

표 3-1 AZ4330 감광제의 공정조건

Step	Process conditions
Spin coating	35 sec @ 2000 rpm
Soft bake	50 sec @ 110 °C
Expose	14 sec @ 25 mW
Develop	3 min

3.1.2 프레넬 마이크로렌즈 공정 과정

유리 프레넬 마이크로렌즈는 실리콘 하부가 연결된 실리콘 틀을 형성 후 두 번의 열 재흐름 공정을 통해 렌즈를 형성하게 된다. 실리콘 틀 하부를 관통하기 위해 SCREAM 공정을 참고하였다[14]. 유리 프레넬 마이크로렌즈를 제작하는 구체적인 방법은 그림 3.1에 상세히 나타나있다. 우선 렌즈가 형성될 부분을 TEOS 박막 화학기상 증착 및 건식 식각 공정을 거쳐 형성한다(그림 3.1(a)). 패턴 마스크는 AZ4330 감광제를 이용하였다. TEOS 박막 증착 및 식각은 모두 Applied Material Korea 社의 P-5000 장비를 이용하였다. 후속 공정인 심도 반응성 이온식각(Deep reactive ion etching, DRIE) 공정을 고려하여 TEOS 박막이 4 μm 두께 이상을 가지도록 하였다. 이후, 실리콘 틀의 지지대 형성을 위해 실리콘 틀보다 넓은 원형 알루미늄 마스크를 형성해준다. (그림 3.1(b)). 알루미늄 패턴 마스크는 AZ4330 감광제를 이용하였다. 알루미늄 마스크는 열 증착과 건식 식각을 통해 형성한다. 알루미늄 열 증착은 무한진공社의 MHS-1800장비를 이용하였으며 1800 Å를 증착하였다. 건식 식각은 Oxford Instrument 社의 RIE 80 plus장비를 이용하였다. 알루미늄 건식 식각의 공정조건으로 Cl_2 10 sccm, BCl_3 40 sccm의 가스를 주입하였으며 100 W, 50 mTorr 조건에서 4 분간 진행하였다. 실리콘 림 지지대를 형성할 알루미늄 마스크 영역을 형성한 후 DRIE 공정으로 프레넬 마이크로렌즈가 채워질 구멍을 형성한다(그림 3.1(c)). PLASMA-THERM 社의 SLR-770-10R-B 장비를 이용하였으며 실리콘을 130 μm 식각하였다. 실리콘 림 측벽 보호를 위해 2 μm 두께의 TEOS 박막을 PECVD 공정을 통해 형성하고 렌즈가 채워질 바닥면은 건식 식각으로 TEOS 박막을 제거해준다(그림 3.1(d)). TEOS 박막 증착 및 식각은 모두 Applied Material Korea 社의 P-5000 장비를 이용하였다. 하부가 연결된 원형 실리콘 구조물을 형성하기 위해 DRIE 공정 후 동일 장비를 이용하여 등방 SF_6 RIE을 진행한다(그림 3.1(e), (f)). 실리콘

지지대는 실리콘 림보다 넓은 면적이기 때문에 제거되지 않고 남아있게 된다. 실리콘 구조물 하부가 모두 관통된 것을 확인하기 위해 FE-SEM 검사를 진행한다. Hitachi 社의 S-4800을 이용하였다. 진공에서 양극접합으로 유리 웨이퍼를 제작된 실리콘 웨이퍼에 접합 후 퍼니스에서 열 재흐름 공정을 850℃에서 8시간 진행하여 실리콘 구멍에 유리를 채운다(그림 3.1(h)). 열 재흐름 공정은 서울일렉트로닉 社의 SMF-800장비를 이용하였다. CMP (Chemical mechanical polishing) 및 DRIE 공정으로 유리 원기둥을 형성한다(그림 3.1(i)). 두 번째 열 재흐름 공정을 850℃에서 40분 진행하여 유리 프레넬 마이크로렌즈를 형성한다(그림 3.1(j)). 형성된 프레넬 마이크로렌즈를 NanoFocus 社의 3D surface profiler를 이용하여 표면 프로파일을 확인하였다. 이후 뒷면 CMP를 진행하여 실리콘을 제거해준다(그림 3.1(k)).



(a) TEOS 박막 형성 및 식각



(b) Al 증착



(c) Al 건식 식각 및 DRIE



(d) 측벽 보호용 TEOS 증착 후 바닥면 TEOS 식각



(e) DRIE 진행



(f) SF₆ 등방 식각



(g) DRIE 진행



(h) Glass wafer와 양극접합 후 열 재흐름 공정 진행



(i) DRIE 진행



(j) 2번째 열 재흐름 공정을 통한 프레넬 마이크로렌즈 형성



(k) 뒷면 CMP 진행

그림 3.1 유리 프레넬 마이크로렌즈 공정 과정

3.1.3 마이크로스캐너 공정 과정

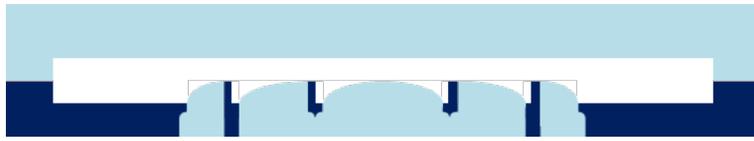
마이크로스캐너 공정은 프레넬 마이크로렌즈 공정에 연결되어 진행된다. 우선 비정질 실리콘 증착 및 건식 식각을 통해 유리 웨이퍼에 마스크 층을 형성한다. 49%의 불산 용액으로 115 μm 의 캐비티를 습식 식각한다(그림 3.2(a)). 제작된 유리 웨이퍼(그림 3.2(a))와 프레넬 렌즈 기관(그림 3.1(j))을 양극 접합 후 뒷면 CMP를 진행하여 설계한 스캐너 두께를 형성한다(그림 3.2(c)). 최종적으로 알루미늄 열 증착 및 건식 식각을 통해 마스크 층을 형성 후 DRIE 공정을 통해 소자를 릴리즈한다.



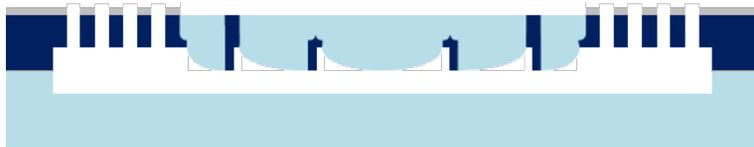
(a) 불산 습식 식각



(b) 열 재흐름 공정



(c) 양극접합



(d) Al 패터닝 후 릴리즈 진행

그림 3.2 유리 프레넬 마이크로가 결합된 광스캐너의 공정 과정

3.2 프레넬 마이크로렌즈공정 결과

3.2.1 실리콘 몰드 공정 결과

프레넬 마이크로렌즈를 제작하기 위해서 실리콘 하부가 관통된 실리콘 원환 구조를 형성해야 한다. 이를 SCREAM 구조를 참고하여 제작하였다[14]. 제작된 실리콘 몰드는 그림 3.3에 나와있다. 추가 DRIE 공정을 통해 원형 지지대는 실리콘 몰드 하부를 제외하고 제거된다. SF₆ 등방 식각 공정을 통해 실리콘 하부가 관통되는데 부족한 공정 시간은 그림 3.4과 같이 하부가 미 관통되어 각 개구부가 동일한 곡률 반지름을 가지지 않을 것이다. 따라서 충분한 등방 식각이 필요하다. 하지만 과도한 등방 식각은 실리콘 몰드의 하부를 식각하는 문제를 발생시키기 때문에 적절한 공정 조건을 확립하는 것이 중요하다.

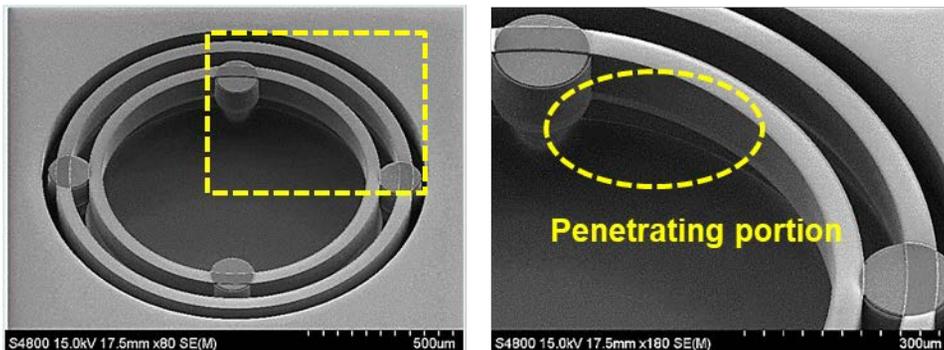


그림 3.3 제작된 실리콘 몰드의 SEM 사진

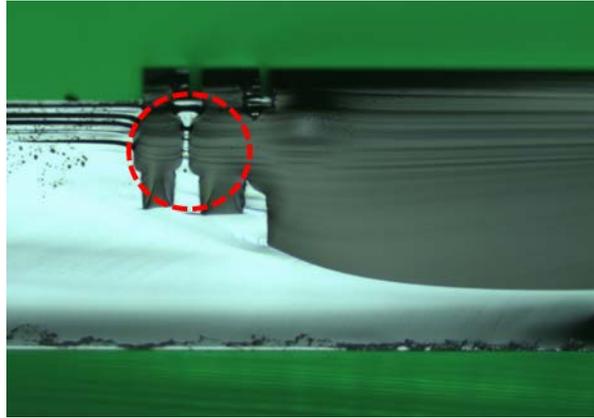
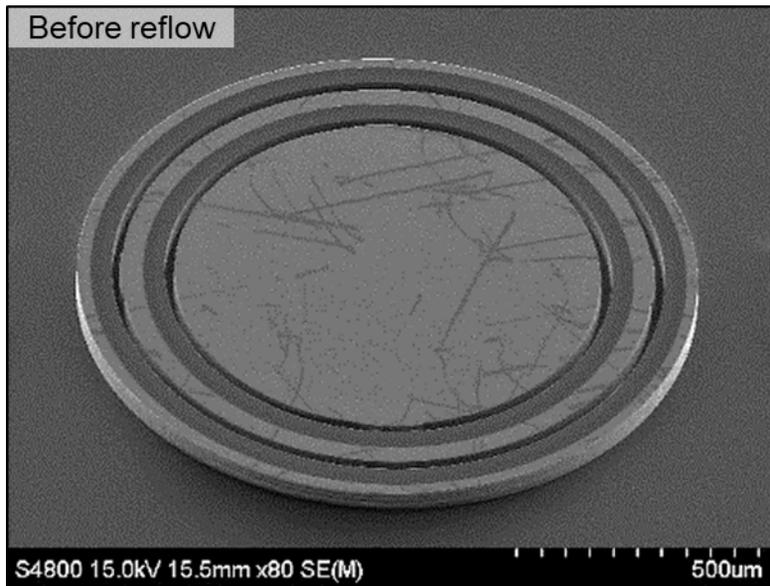


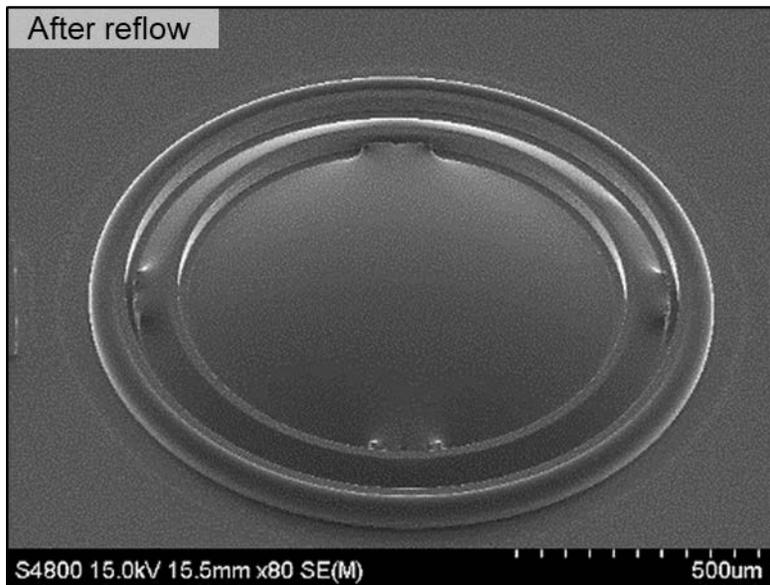
그림 3.4 실리콘 몰드의 하부가 일부 미 관통된 광학 사진

3.2.2 유리 프레넬 마이크로렌즈 공정 결과

열 재흐름 공정 전·후의 SEM 사진이 그림 3.5에 나타나있다. 3개의 동심원으로 이루어진 유리 원기둥은 열 재흐름 공정을 통해 동일 곡률 반경을 가지는 프레넬 렌즈로 형성된다. 열 재흐름 공정은 퍼니스에서 850 °C의 온도에서 40분간 진행된다. 표면 프로파일은 NanoFocus 사의 3D Surface Profiler로 측정하였으며, 결과는 그림 3.6 그리고 3.7에 나타내었다. 표 3-1은 측정된 프로파일의 분석 결과이다. 제작된 프레넬 마이크로렌즈의 곡률반경은 계산 값과 측정값에서 평균 3.63 %의 오차가 발생하였으며 유리 동심원이 동일한 곡률반경을 형성한 것을 확인할 수 있다. 측정된 평균 거칠기(Ra)는 36 nm이다.



(a)



(b)

그림 3.5 열 재흐름 공정 (a)전 · (b)후의 유리 원기둥과 프레넬 마이크로렌즈의 SEM 사진

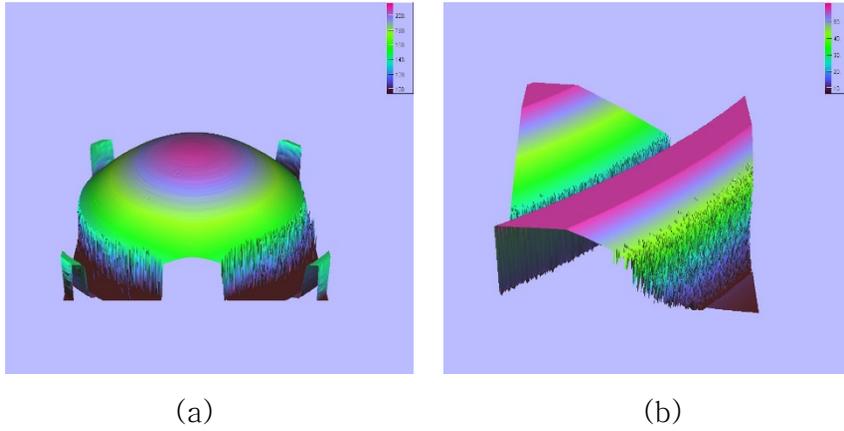


그림 3.6 프레넬 마이크로렌즈 3D 프로파일러 측정 이미지

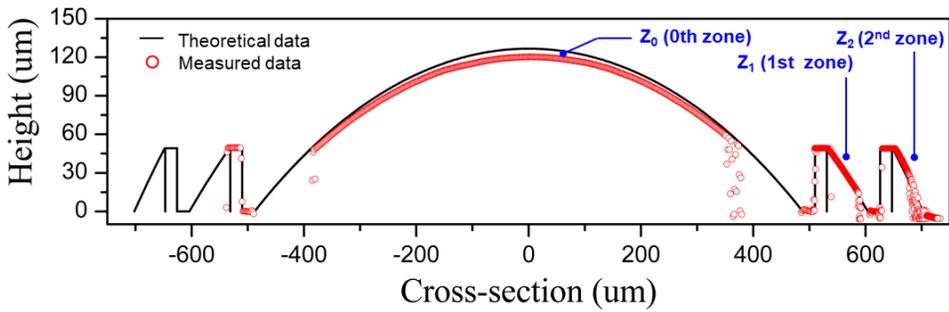


그림 3.7 측정된 프레넬 마이크로렌즈의 표면 프로파일

3.3 마이크로스캐너 공정 결과

그림 3.9과 그림 3.10은 유리 프레넬 마이크로렌즈가 결합된 광 스캐너의 공정 결과이다. 유리 프레넬 마이크로렌즈가 성공적으로 마이크로 스캐너에 결합되었다.

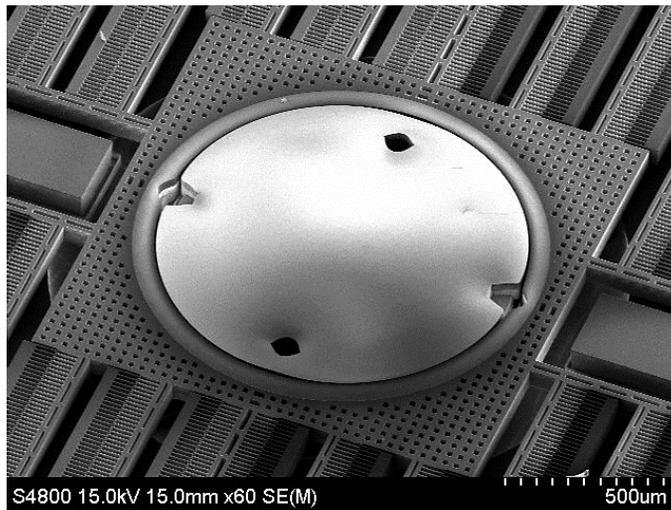


그림 3.9 완성된 소자의 SEM 사진

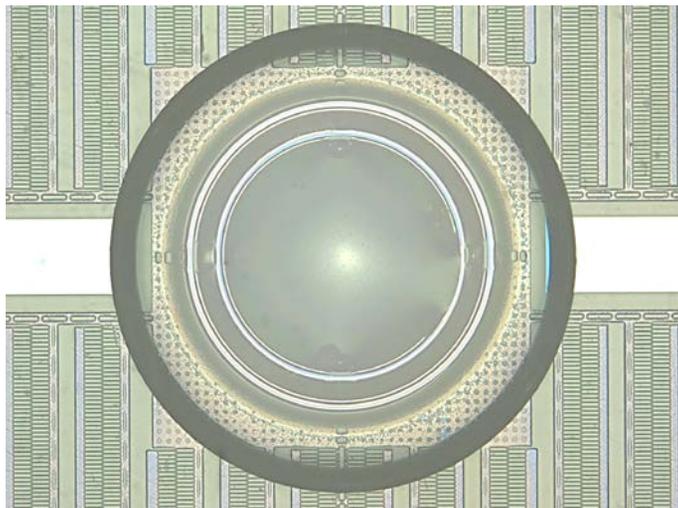


그림 3.10 완성된 소자의 광학 사진

실리콘을 수직 식각 할 때 발생한 언더컷 현상에 의해 그림 3.11과 같이 제작된 스프링의 폭은 감소하였다. 처음 마스크를 설계할 때 스프링 폭은 10 μm 이었으나 제작된 스프링 폭은 8.78 μm 로 1.22 μm 의 언더컷이 발생하였다. H형태의 지지대를 스프링 주변에 위치시켜 스프링의 로딩 현상을 줄일 수 있었다. 언더컷에 따른 스프링 폭 감소는 소자의 공진주파수를 변화시킨다. 변화된 스프링 폭으로부터 예측되는 공진주파수는 1.323 kHz로 설계값인 1.6 kHz보다 0.277 kHz가 감소하였다. 초기 설계시 언더컷을 예상하고 스프링 폭을 더 넓게 가져가면 오차를 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

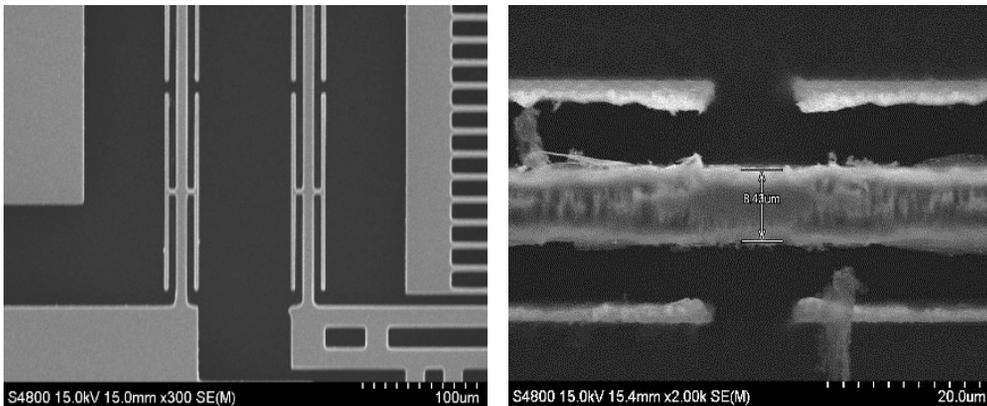


그림 3.11 스프링 SEM 사진

표 3.3 제작된 스캐너의 스프링 치수

	Design	Fabricated
Spring width	10 μm	8.78 μm

표 3.4 측정된 치수에 따른 예상되는 스캐너의 공진주파수

	Design	Fabricated
Resonant frequency	1.6 kHz	1.323 kHz

제 4 장 측 정

4.1 PCB 제작 및 소자와 결합

그림 4.1과 같이, 제작된 소자의 동적 및 광학 측정을 위해 소자를 PCB기판에 결합하였다. 두 개의 PCB보드와 12개의 100mil header가 납땜으로 결합되었다. 제작된 마이크로렌즈 스캐너를 열 경화성 에폭시(353ND, Epoxy Technology)로 PCB에 부착하였으며 금 배선을 통해 연결하였다.

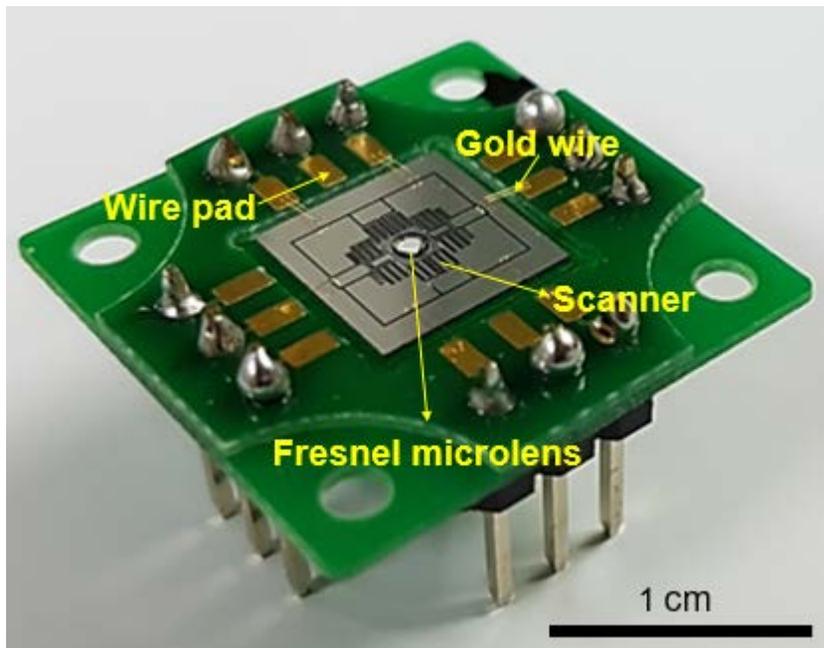


그림 4.1 제작된 PCB에 결합된 소자

4.2 동적 응답 측정

4.2.1 실험 장비 구성

제작된 소자의 동적 특성을 측정하기 위해 그림 4.2와 같이 실험 장비를 구성하였다. 연산증폭기(LM324N, Texas Instruments)를 이용한 증폭회로를 통해 함수발생기(AFG310, Tektronix)에서 출력된 신호를 증폭시켜 제작된 프레넬 마이크로렌즈 스캐너에 인가하였다. 전원공급장치(E3647A, Tektronix)를 이용하여 연산증폭기에 전원을 공급하였으며 오실로스코프(TDS2012, Tektronix)를 통해 인가 신호를 확인하였다. 움직이는 스테이지의 현미경에 연결된 이미지센서(Progres C3 Cool, Jenoptik)를 통해 측정이 이루어졌다.

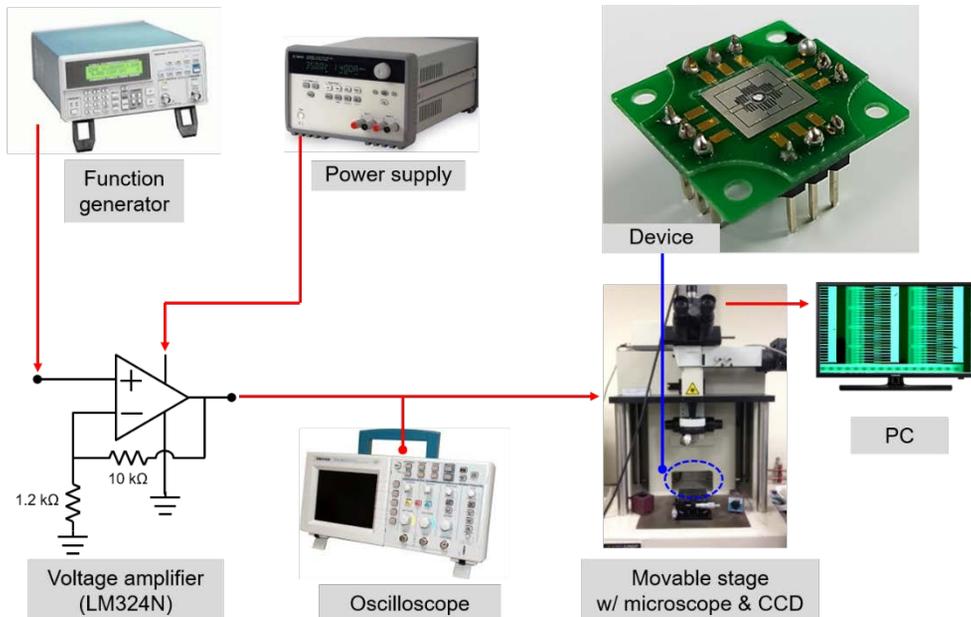


그림 4.2 실험 측정 장비 구성

4.2.2 주파수 응답

제작된 프레넬 마이크로렌즈 스캐너의 공진주파수를 측정하였으며 결과는 표 4.1과 같다. 모든 측정은 대기압에서 진행되었다. 2 Hz 간격으로 입력신호 주파수를 인가하였으며 현미경에 연결된 이미지 센서를 통해 최대 변위일 때 주파수를 측정하였다. 제작된 6개의 소자에 대하여 공진 주파수의 균일성을 측정한 결과 표 4.1와 같이 평균 1.242 kHz가 측정되었다.

그림 4.3은 6개의 샘플 중 샘플 1의 주파수 응답 특성을 측정한 결과이다. 1.2 kHz부터 1.38 kHz까지 2Hz 간격으로 주파수를 입력하여 구동 변위를 측정하였다. 측정된 공진주파수는 1.292 kHz으로 초기에 설계한 1.6 kHz보다 19 % 낮은 공진주파수가 측정되었으며 1 ms 이하의 구동속도를 확보하였다. 오차의 원인은 건식 식각 과정에서 발생한 언더컷에 따른 스프링 상수가 감소하였기 때문이다. 공정 결과로부터 예측한 공진주파수는 1.323 kHz으로 측정 결과와 2.34 %의 오차를 보였고 예측값과 측정값이 유사하다. 공정에서 발생하는 언더컷을 고려한 스프링 폭을 설계하면 오차를 충분히 줄일 수 있을 것이다.

샘플 1의 하측 차단주파수 $f_L=1.284$ kHz가 도출되었으며 상측 차단주파수 $f_H=1.296$ kHz가 도출되었으며 대역폭은 12 Hz이다. 따라서 Q-factor는 107.7로 지금까지 보고된 평면형 스테이지의 상압에서의 Q-factor인 10~100 정도 보다 상대적으로 우수한 결과를 보였다.

표 4.1 샘플 간 공진 주파수 균일성 측정 데이터

Sample number	#1	#2	#3	#4	#5	#6	Avg±SD
fr (Hz)	1292	1268	1267	1238	1192	1194	1242 ±37.90

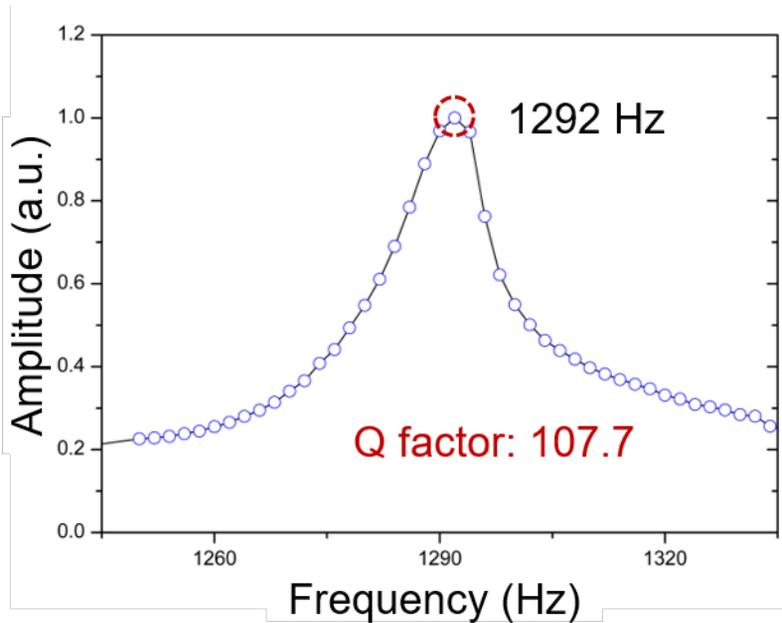


그림 4.3 스캐너의 측정된 주파수 응답(샘플 1)

4.2.3 횡변위

제작된 프레넬 마이크로렌즈 스캐너의 횡변위를 측정하였으며 결과는 그림 4.4과 같다. 모든 측정은 대기압환경에서 공진구동시에 진행되었다. 함수발생기에서 생성된 입력 신호는 LM324N 연산증폭기를 이용한 회로로 증폭하여 소자에 인가하였으며 현미경에 연결된 이미지센서를 통해 측정하였다. 제작된 6개의 소자에 대하여 구동 변위를 측정한 결과 표 4.2와 같다. 각 소자의 공진 주파수 조건에서 17.5 V 직류 바이어스 전압과 피크 투 피크 35 V의 교류 입력을 인가하였다.

그림 4.4은 샘플 1의 인가된 교류 전압의 함수로서 측정된 공진시 구동 변위이다. 35 V의 피크 투 피크 교류 입력을 인가하였을 때 수평방향 변위는 $\pm 50.5 \mu\text{m}$ 로 인가 전압을 고려하였을 때 상대적으로 큰 구동 변위를 보였다.

표 4.2 샘플 횡변위 균일성 측정 데이터

Sample number	#1	#2	#3	#4	#5	#6
fr (kHz)	1.292	1.268	1.267	1.238	1.192	1.194
Displacement (μm)	50.50	50.00	35.64	48.40	47.77	50.80

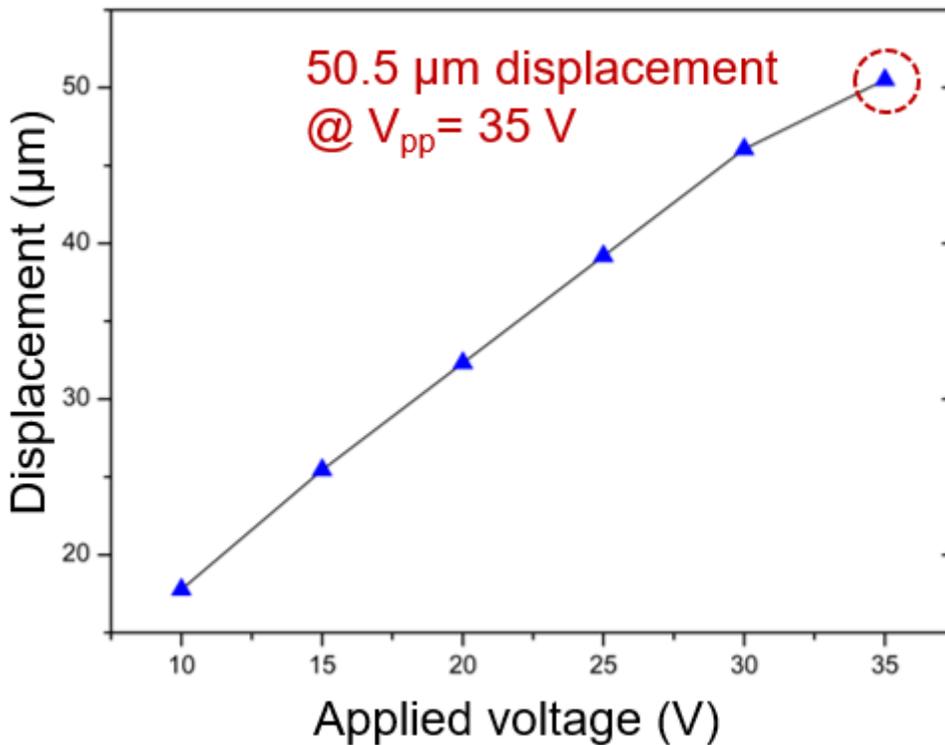


그림 4.4 인가 된 교류 전압의 함수로서 측정된 공진 시 구동 변위(샘플 1)

4.3 내열성 평가

제작된 프레넬 마이크로렌즈 스캐너의 내열성을 평가하였다. 전조등 모듈은 국부적으로 200 °C까지 올라가기 때문에 AFLS에 적용을 위해서는 내열성 확인이 필수적이다. 내열성 평가는 200 °C의 오븐에서 10분간 소자를 가열 전·후 구동 변위의 변화를 확인하였다. Drying oven(C-DO, 창신)에서 평가가 진행되었다. 구동 변위 측정은 18 V 직류 바이어스 전압(V_{bias})을 인가하면서 교류 전압(V_{pp})를 10 V에서 30 V까지 증가시키며 구동 변위를 측정하였다. 모든 측정은 대기압환경에서 공진구동시에 진행되었다. 측정 결과는 그림 4.5와 같다. 가열 전·후 구동 변위의 최대 차이는 1.95 μm 이며 평균 0.98 μm 가 측정되었다. 따라서 가열 전·후 유의차가 없으며 200 °C에서 10분간 가열할 때 소자의 안정성이 성공적으로 검증되었다.

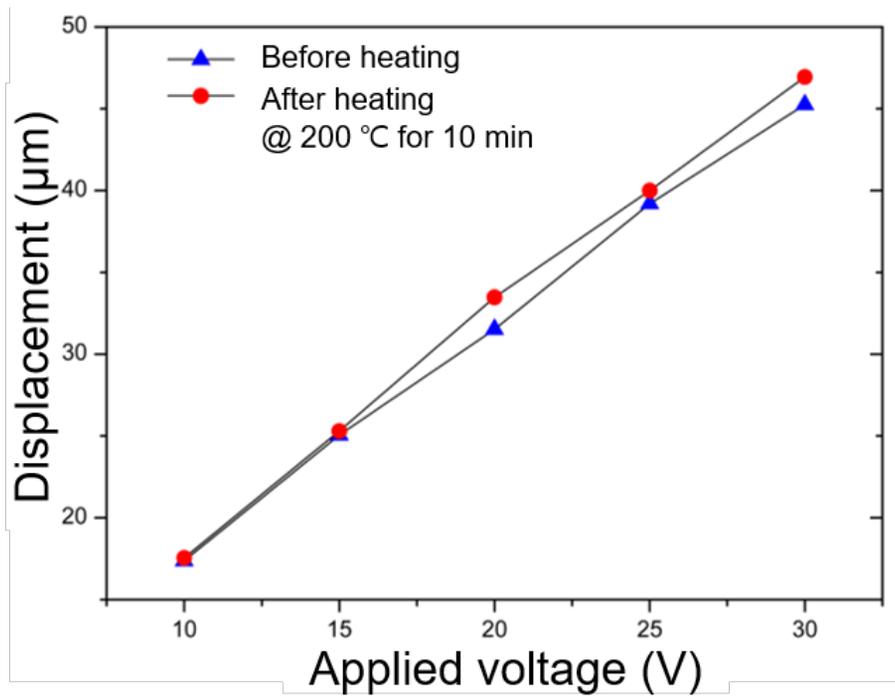


그림 4.5 가열 전·후 구동 변위 변화

4.4 광학 측정

광학 측정 장비의 구성을 그림 4.5와 그림 4.6에 나타내었다. He-Ne 레이저(λ : 632.8 nm, JDSU)로부터 인가된 광선은 빔 익스팬더($\times 10$)를 통해 확장되어 스캐너의 마이크로렌즈에 집중된다. 조향된 빛은 가장 우측의 검정 스크린에서 측정된다. 스크린은 소자로부터 143 mm가 떨어져 있다. 스캐너에 18.8 V 직류 바이어스 전압과 피크 투 피크 23 V의 교류를 입력한 결과 ± 4 mm의 빛의 조향이 이뤄졌으며 레이저 폭을 2 mm로 가정하고 이를 빼면 ± 3 mm의 빛의 조향이 측정되었다. 따라서 레이저의 광학 조향 각도는 $\pm 1.20^\circ$ 으로 공정 결과로부터 예측한 $\pm 1.05^\circ$ 와 0.15° 의 오차를 나타내었다. 레이저의 폭을 2 mm로 가정하였기 때문에 발생한 오차이며 완벽한 점광원으로 측정이 가능하면 오차를 충분히 줄일 수 있을 것이다. 광학 측정 결과로부터 제작된 소자가 전조등으로의 이용 가능성을 입증하였다.

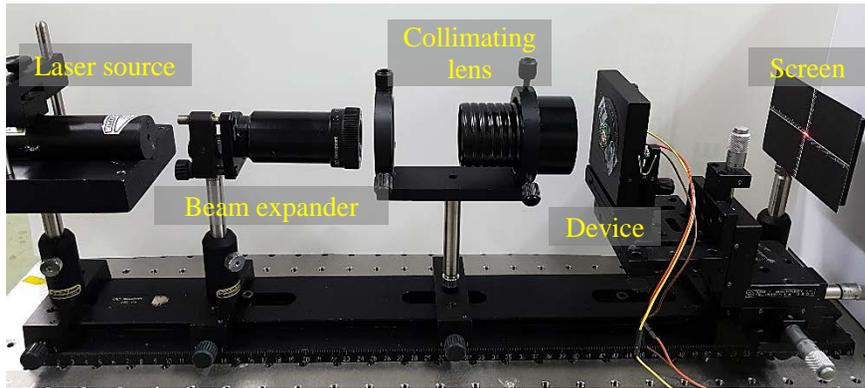


그림 4.6 광학 측정 장비 구성

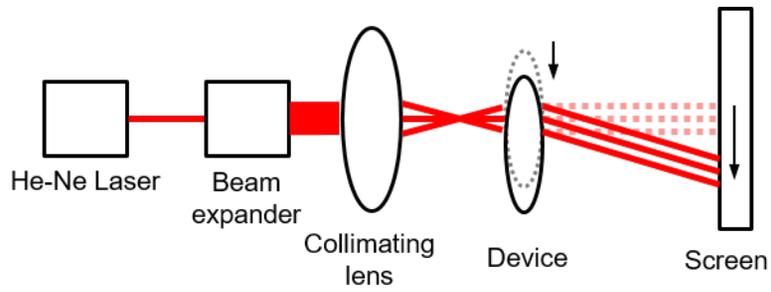


그림 4.7 광학 시스템의 구성도

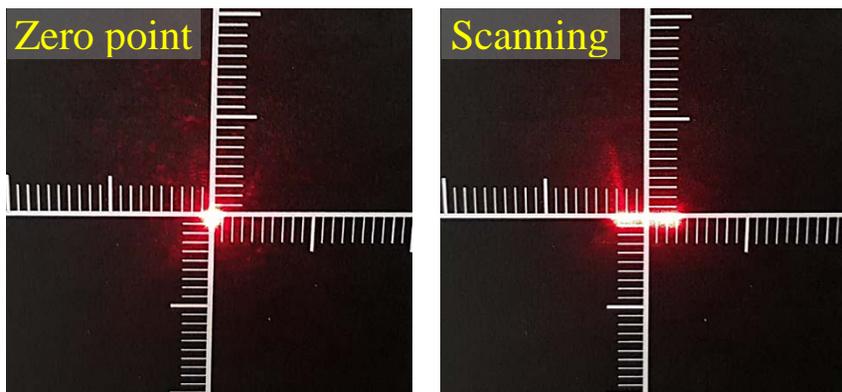


그림 4.8 스캔 라인의 광학 이미지

제 5 장 결 론

본 연구에서는 유리 재흐름 공정을 통해 기존에 없는 새로운 방법으로 프레넬 마이크로렌즈를 제작하는데 성공하였다. 또한, 마이크로 스캐너와 수작업 없이 단위 공정을 통해 결합하는데 성공하였다. 3개의 렌즈 존으로 이루어진 1.4 mm 지름의 프레넬 마이크로렌즈는 예상되는 표면 프로파일과 3.63 %의 오차를 나타내었다. 또한 평균 표면 거칠기는 36 nm이다.

동적 특성은 모두 대기압에서 측정되었다. Op-amp 회로를 통해 증폭된 신호를 소자에 입력하였으며 공진주파수는 1.292 kHz가 그리고 Q 인자는 107.7가 측정되었다. 공진 모드에서 17.5 V 직류 바이어스 전압과 피크 투 피크 35 V의 교류 입력을 인가한 결과 $\pm 50.5 \mu\text{m}$ 의 횡 방향 변위를 구동하였다. 광학 시연을 통하여 $\pm 1.20^\circ$ 의 레이저 조향 각도가 측정되었다.

제안된 유리 프레넬 마이크로렌즈 공정 방법은 렌즈의 부피 및 질량을 획기적으로 줄일 수 있는 방법이며 추가적인 수작업 없이 구동부와의 결합이 가능하기 때문에 광 스캐너에 적용 시 높은 시너지를 발휘할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] C. P. B. Siu, H. Zeng, and M. Chiao, "Magnetically actuated MEMS microlens scanner for in vivo medical imaging," *Optics Express*, vol. 15, pp. 11154-11166, Sep 3 2007.
- [2] H. C. Park, C. Song, and K. H. Jeong, "Micromachined lens microstages for two-dimensional forward optical scanning," *Optics Express*, vol. 18, pp. 16133-16138, Jul 19 2010.
- [3] W. Choi, G. Sigal, V. Rubtsov, and C.-J. Kim, "A micro translating lens unit for stereo imaging through single-image endoscope," in *25th IEEE International MEMS 2012 Conference*, Paris, France, 2012, pp. 3-6.
- [4] S. Kwon and L. P. Lee, "Stacked two Dimensional Micro-lens Scanner for Micro Confocal Imaging Array," in *the 15th IEEE International Conference on MEMS*, Las Vegas, USA, 2002, pp. 483-486.
- [5] J. Chou, K. Yu, D. Horsley, B. Yoxall, S. Mathai, M. R. T. Tan, *et al.*, "Robust free space board-to-board optical interconnect with closed loop MEMS tracking," *Applied Physics a-Materials Science & Processing*, vol. 95, pp. 973-982, Jun 2009.
- [6] S. Yoo, J.-Y. Jin, J.-G. Ha, C.-H. Ji, and Y.-K. Kim, "Two-dimensional optical scanner with monolithically integrated glass microlens," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 24, p. 055009, 2014.
- [7] C. Y. Huang, C. C. Chen, H. Y. Chou, and C. P. Chou, "Fabrication of fresnel lens by glass molding technique," *Optical Review*, vol. 20, pp. 202-204, Mar 2013.
- [8] C. David, J. Wei, T. Lippert, and A. Wokaun, "Diffractive grey-tone phase masks for laser ablation lithography," *Microelectronic Engineering*, vol. 57-8, pp. 453-460, Sep 2001.
- [9] M. K. Lee and K. K. Kuo, "Single-step fabrication of Fresnel microlens

array on sapphire substrate of flip-chip gallium nitride light emitting diode by focused ion beam," *Applied Physics Letters*, vol. 91, Jul 30 2007.

[10] Y. Sung-hyun, K. Dae-Gon, J. Chang-Hyeon, and K. Yong-Kweon, "Modeling of glass biconvex microlens with separate aperture radius," 2014, pp. 1300-1301.

[11] A. Schilling, R. Merz, C. Ossmann, and H. P. Herzig, "Surface profiles of reflow microlenses under the influence of surface tension and gravity," *Optical Engineering*, vol. 39, pp. 2171-2176, Aug 2000.

[12] Y. Chen, A. Y. Yi, D. G. Yao, F. Klocke, and G. Pongs, "A reflow process for glass microlens array fabrication by use of precision compression molding," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 18, May 2008.

[13] A. Tuantranont, V. M. Bright, J. Zhang, W. Zhang, J. A. Neff, and Y. C. Lee, *Optical beam steering using MEMS-controllable microlens array* vol. 91, 2001.

[14] N. C. MacDonald, "SCREAM MicroElectroMechanical Systems," *Microelectronic Engineering*, vol. 32, pp. 49-73, Sep 1996.

Abstract

Design and Fabrication of Glass Fresnel Microlens for Optical Scanner

Minsu Jung

Department of Electrical Engineering and Computer Science

The Graduate School

Seoul National University

This paper describes a new method for fabricating glass Fresnel microlenses for optical scanners pre-bonded to a silicon substrate through a glass thermal reflow process. Since the fabricated glass Fresnel microlens is pre-assembled to the silicon substrate, it is possible to combine with the actuator through the semiconductor process without additional manual work. Thanks to the thin and light structural features of the Fresnel lens, it is possible to design an optical scanner with a large area lens and a high driving speed. In addition, compared with conventional spherical lenses, the focal length can be shortened and the design freedom is high. In this study, we made glass Fresnel microlens for the first time in academia through semiconductors process and succeeded in driving by combining with microscanner.

The fabricated glass Fresnel microlens consists of three concentric circles and has a diameter of 1.4 mm. The average surface roughness was measured at 36 nm. Compared to a spherical lens with

the same radius of curvature and diameter, it achieved a weight reduction of 24% and a thickness of 42.4%. Increasing the number of glass concentric circles can further reduce volume and thickness. The microscanner is supported by four folded-beam springs and a Fresnel microlens is located at the center.

The resonance frequency of the optical scanner measured at atmospheric pressure was 1.292 kHz and the Q-factor was measured as 107.7. When a DC bias voltage of 17.5 V and an AC voltage of 17.5 V amplitude were applied, the lateral displacement exceeding $\pm 50 \mu\text{m}$ was achieved. Through the optical demonstration, the laser steering angle of $\pm 1.20^\circ$ was measured.

The fabricated Fresnel microlens scanner achieved the fastest driving speed among forward optical scanners using glass microlenses with diameters greater than 1 mm and would be a new solution to lightweight large area microlenses. In addition, a method of manufacturing an asymmetric structure such as a Fresnel microlens through a glass thermal reflow process can be utilized to fabricate more complicated structures.

Keywords : Fresnel microlens, Thermal reflow, Optical scanner

Student Number : 2016-23836